

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Elektrohydraulické řízení vstřikovacího lisu na plasty
Electro-hydraulic Control of Injection Moulding Machine
for Plastics

Student:

Bc. Jaroslav Kovář

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Bohuslav Pavlok, CSc.

Ostrava 2011

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití školního díla a § 60 - školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo závěrečnou práci nevýdělečně užít ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO v případě zájmu její strany, uzavřu licenční smlouvu, s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jaroslav Kovář

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Zborovská 4180/13, 767 01 Kroměříž

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

KOVÁŘ, J. *Elektrohydraulické řízení vstřikovacího lisu na plasty: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2011, 56 s. Vedoucí práce: Pavlok, B.

Diplomová práce se zabývá návrhem elektrohydraulického řízení vstřikovacího lisu na plasty. Úvod práce patří seznámení s konstrukcí lisu a principy lisování plastů. Na základě analýzy funkce stroje jsou navrženy dvě varianty řešení hydraulického ovládání. Po jejich vyhodnocení je zpracováno funkční hydraulické schéma a návrh regulačního systému polohově-tlakového řízení přítlaku formy. Následuje výpočtová část, zaměřená na statické a dynamické parametry systému. V závěru jsou vyspecifikovány základní hydraulické prvky a proveden konstrukční návrh ovládacího bloku uzavírání formy.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

KOVÁŘ, J. *Electro-hydraulic Control of Injection Moulding Machine for Plastics: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipments, 2011. 56 s. Thesis head: Pavlok, B.

Master thesis deals with project of electro-hydraulic control of injection moulding machine for plastics. At the beginning, the thesis introduces the construction of the press machine and principles of plastic molding. Based on the analysis of machine functions are designed two versions of hydraulic control. After the evaluation is processed functional hydraulic circuit and position-control system design of the form close. The following is the calculation part, focused on the static and dynamic system parameters. There are specified basic hydraulic components and designed control block of form close at the end.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	9
1. Úvod	12
1.1 Historie vstřikování plastů	12
1.2 Cíle diplomové práce	12
1.3 Důvody modernizace lisu	13
2. Přehled současného stavu řešené problematiky	14
2.1 Konstrukce vstřikovacího lisu	14
2.1.1 Vstřikovací jednotka	15
2.1.2 Uzavírací jednotka	16
2.1.3 Vstřikovací forma	17
2.2 Termoplastické materiály	18
2.3 Hydraulický pohon vstřikovacího lisu	19
2.3.1 Přímý pohon uzavírání formy	19
2.3.2 Pohon s hydraulickým akumulátorem	19
2.4 Řízení a kontrola procesních parametrů	20
3. Návrh alternativních řešení hydraulického řízení uzavírání formy	21
3.1 Zadané parametry lisování	21
3.2 Hydraulický obvod s regulačním hydrogenerátorem, diferenciálním hydromotorem a akumulátorem	22
3.2.1 Složení hydraulického obvodu	23
3.2.2 Energetická bilance obvodu s hydrogenerátorem s regulací na konst. tlak	23
3.2.3 Popis funkce obvodu a řízení	24
3.3 Hydraulický obvod uzavírání formy s regulačním systémem SYDFE a sdruženým hydromotorem	24
3.3.1 Popis funkce hydraulického obvodu	24
3.4 Porovnání jednotlivých variant, vyhodnocení	26
4. Hydraulické funkční schéma pro řízení průtoků hydromotoru	29
4.1 Spínací frekvence hydraulického obvodu	29
4.2 Řízení oběhové jednotky, teplotní stabilizace	31
5. Základní návrh regulačního systému pro přesné polohově-tlakové řízení přímočarého hydromotoru	32
5.1 Elektrohydraulický regulační systém pohonu hydromotoru	33
6. Výpočet statických a dynamických parametrů pohonu, včetně stanovení parametrů přímočarého hydromotoru	35
6.1 Výpočet rozměrů pístu a pístnice přímočarého hydromotoru	35
6.2 Kontrola bezpečnosti rozměru pístnice	36
6.3 Výpočet síly stěny válce pomocí teorie tlustostěnných nádob	38
6.4 Výpočet průtoků kapaliny v jednotlivých fázích pohybu hydromotoru	38

6.5 Průběh rychlostí pohybu hydromotoru.....	40
6.6 Rozběh a brždění hydromotoru	42
6.7 Návrh dekompresního ventilu	43
7. Specifikace hlavních hydraulických prvků.....	46
7.1 Hydrogenerátor a elektromotor	46
7.2 Proporcionální rozváděč.....	47
7.3 Oběhová jednotka chlazení	47
7.4 Potrubní rozvody	49
7.5 Hydraulický zámek	49
8. Konstrukční návrh ovládacího bloku zavírání formy vstřikovacího lisu.....	50
9. Závěr	51
10. Přílohy.....	52
Literatura	55

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název	Rozměr
A	pomocný výpočtový součinitel	[1]
C	kapacita hydromotoru	[m ³ Pa ⁻¹]
D_1	vrtání pístnice	[m]
D_2	průměr válce	[m]
F_1	max. síla vyvozená hydromotorem při uzavírání	[N]
F_2	max. síla vyvozená hydromotorem při dovření formy	[N]
F_3	max. síla vyvozená hydromotorem při otevírání formy	[N]
F_4	max. síla vyvozená hydromotorem při diferenciálním zapojení	[N]
F_D	dynamická složka síly	[N]
F_S	statická složka síly	[N]
J_p	moment setrvačnosti průřezu pístnice	[m ⁴]
K	modul objemové stlačitelnosti	[Pa]
$P_{1,2}$	výkon systému	[W]
P_E	výkon elektromotoru	[W]
P_H	výkon hydrogenerátoru	[W]
P_Z	ztrátový výkon	[W]
Q_1	vstupní průtok	[m ³ s ⁻¹]
Q_2	výstupní průtok	[m ³ s ⁻¹]
$Q(d)$	průtok při diferenciálním zapojení	[m ³ s ⁻¹]
Q_c	průtok kapaliny clonou	[m ³ s ⁻¹]
Q_{Hmax}	max. průtok dodávaný hydrogenerátorem	[m ³ s ⁻¹]
Q_i	okamžitá spotřeba oleje	[m ³ s ⁻¹]
Q_R	průtok kanály R	[m ³ s ⁻¹]
Q_T	průtok kanály T	[m ³ s ⁻¹]
Q_s	střední průtok	[m ³ s ⁻¹]
$R1, R2, R3$	přívodní větve hydromotoru – přívod tlaku	[-]
R_e	mez kluzu	[Pa]
R_m	pevnost materiálu	[Pa]
S_1, S_2, S_3	plocha pístu hydromotoru	[m ²]
S'_1, S'_2, S'_3	potřebná plocha pístu hydromotoru	[m ²]
S_m	plocha průřezu pístnice	[m ²]
S_c	plocha nejmenšího průměru clony	[m ²]
$T1, T2$	přívodní větve hydromotoru – sání	[-]
T_B	časová konstanta budícího signálu	[s]
T_c	celková doba cyklu	[s]
T_d	časová konstanta dsekomprese	[s]
T_O	celková doba otevírání formy	[s]
T_U	celková doba uzavírání formy	[s]

V_g	geometrický objem	[m ³]
V_H	objem naplněného hydromotoru	[m ³]
a	zrychlení hydromotoru	[m·s ⁻²]
d_1, d_2	průměr pístnice	[m]
d_s	průměr potrubí sání	[m]
d_{sP}	průměr potrubí sání hydromotoru	[m]
d_t	průměr potrubí tlakové	[m]
f_0	vlastní frekvence	[s ⁻¹]
h	aktuální zdvih	[m]
i	poloměr setrvačnosti	[m]
k_h	statická tuhost	[N·m ⁻¹]
k, k_v	míra bezpečnosti	[1]
l	délka zdvihu	[m]
m_c	celková hmotnost pohyblivé soustavy	[kg]
n	otáčky	[s ⁻¹]
p_0	tlak v odpadní větvi	[Pa]
p_1, p_2, p_3	tlak v komoře hydromotoru	[Pa]
p_{M1}, p_{M2}	pracovní tlak	[Pa]
p_{max}	zkušební tlak	[Pa]
r_1, r_2	poloměr trubky	[m]
t_a, t_b	doba nárůstu / poklesu rampové funkce	[s]
t_d	doba trvání dekomprese	[s]
t_B	doba brzdění pístnice	[s]
t_R	doba rozběhu pístnice	[s]
t_U	doba ustáleného pohybu pístnice	[s]
s_v	síla stěny válce	[m]
t_i	doba odběru oleje	[s]
v_1	rychlost pohybu formy při rychloposuvu	[m·s ⁻¹]
v_2	rychlost pohybu formy při mikroposuvu	[m·s ⁻¹]
v_3	rychlost pohybu formy při otevírání	[m·s ⁻¹]
v_4	rychlost pohybu formy při otevírání – diferenciálním zapojení	[m·s ⁻¹]
v_{sHg}	rychlost kapaliny sání hydrogenerátoru	[m·s ⁻¹]
v_{sM}	rychlost kapaliny sání hydromotoru	[m·s ⁻¹]
Δp_c	tlakový spád na cloně	[Pa]
Δp_p	tlakový spád na proporcionálním prvku	[Pa]
Δp_V	tlakový spád	[Pa]
Δt	úbytek času	[s]
η	účinnost systému	[1]
λ	poměrná štíhlost pístnice	[1]
μ	Poissonův součinitel, průtokový součinitel	[1]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
σ_D	dovolené napětí	[Pa]

σ_{KR}	kritické napětí	[Pa]
σ_{Vmax}	maximální napětí v pístnici	[Pa]
ω_0	vlastní kruhová frekvence	[s ⁻¹]
ω_B	dovolená budící frekvence	[s ⁻¹]

1. Úvod

1.1 *Historie vstřikování plastů*

Je až překvapující zjištění, jaké množství plastových výrobků vyráběných vstřikovacími lisami, nás dnes obklopuje doma i v zaměstnání. Hračky, kuchyňské nádobí, díly automobilů, nemocniční vybavení, počítače, to jsou jen některé ze široké škály plastových produktů, které si našly uplatnění ve všech oborech lidské činnosti. Nyní je prakticky možné vytvořit součást jakéhokoliv tvaru a velikosti a použít materiál, který vlastnostmi nejlépe vyhovuje žádané aplikaci. Injekční vstřikování je nejběžněji používaný a cenově nejefektivnější způsob produkce plastových výrobků. Počáteční náklady velice rychle převáží nízká cena za vyrobenou jednotku při sériové výrobě. Jedná se o termodynamický cyklický tvářecí proces odvozený od lití kovů do kokil.

1.2 *Cíle diplomové práce*

V současné době jsou určujícími oblastmi v technologii vstřikování plastů kvalita, hospodárnost a automatizace. Velmi zřetelně se rýsuje trend zvyšování automatizace, rychlosti a přesnosti polohového řízení. To znamená, že kromě řízení a regulace všech hlavních procesních veličin na vstřikovacím stroji a formě existují další požadavky na pohodlí pracovníků a funkčnost zařízení.

Zadání mé diplomové práce vypsal VŠB-TU Ostrava ve spolupráci s firmou OCHI – INŽENÝRING, spol. s r.o. na základě jejích praktických zkušeností s konstrukcí a servisem hydrauliky a řízením lisovacích strojů. Návrh elektrohydraulického pohonu uzavírání formy, který je úkolem mého řešení, je částí projektu modernizace hydraulických pohonů vstřikolisu *Ferromatik F110*, viz. přílohy na straně 52.

Výpočet a návrh prvků hydraulického obvodu musí být proveden tak, aby zohlednil maximální parametry zařízení a účinnosti jednotlivých navržených prvků. Aby byl správně navržen hydraulický obvod, je nutné se nejdříve seznámit s technologickým procesem, který má navrhované zařízení vykonávat.

1.3 Důvody modernizace lisu

Původní koncept hydraulických pohonů vstřikolisu *Ferromatik F110* je z hlediska dnešních požadavků naprosto nevyhovující. K rekonstrukci bylo nutné přistoupit hned z několika důvodů:

- zrychlení lisovacího cyklu a produkce, zvýšení přesnosti
- velká hlučnost a netěsnost hydraulického obvodu
- zlepšení energetického výkonu
- modernizace a zjednodušení řízení, centralizace všech periferních zařízení
- plnění současných bezpečnostních předpisů a norem

V systému docházelo k tlakovým rázům při dekompresi po lisování a k přehřívání pracovního média vlivem nepřiměřeného maření energie a neefektivní teplotní stabilizace. Proto v další části diplomové práce navrhnu dvě varianty hydraulických obvodů tak, aby plnily funkci uzavírání formy a zároveň dostáli všem nárokům, které jsou na moderní stroje kladeny. Porovnáním a zhodnocením obou variant vyberu jednu, která bude celkově nejvýhodnější. Tuto variantu dále podrobně zpracuji, propočítám a provedu specifikaci hlavních hydraulických prvků.

Tabulka 1 - Závazné normy, předpisy a metodika pro konstrukci strojních zařízení

Číslo legislativy	Popis
ČSN EN ISO 12100-1a 2	Bezpečnost strojních zařízení
ČSN EN ISO 14121-1a 2	Bezpečnost strojních zařízení – Posouzení rizika
ČSN EN ISO 13849-1	Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 1: Všeobecné zásady pro konstrukci
ČSN EN ISO 13849-2	Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní části ovládacích systémů – Část 2: Ověřování
ČSN EN 693	Obráběcí a tvářecí stroje – Bezpečnost – Hydraulické lisy
ČSN EN 982	Bezpečnost strojních zařízení – Bezpečnostní požadavky pro fluidní zařízení a jejich součásti - Hydraulika

2. Přehled současného stavu řešené problematiky

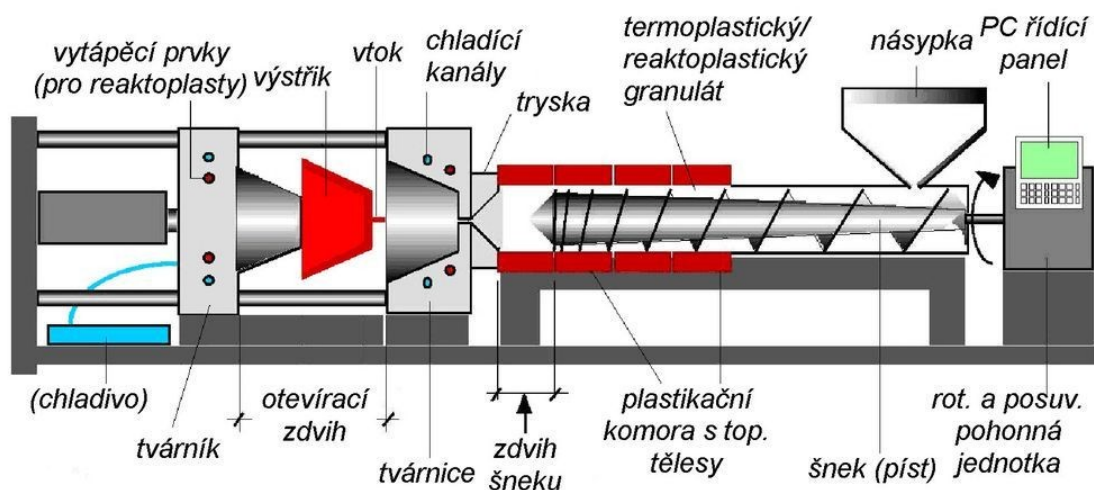
2.1 Konstrukce vstřikovacího lisu

Vzhledem k vlastnostem a způsobu výroby se již od počátku jedná o stroje především hydraulické. V průběhu několika posledních desetiletí postoupil kupředu vývoj elektrického pohonu a několik průkopníků z řad konstruktérů realizovalo vstřikovací lisy elektrického typu, které zaznamenaly úspěch, ačkoli stále početně převažují lisy hydraulické.

Vstřikovací stroje nabízené na trhu se z části velmi liší svou koncepcí a vybavením. Kupující mají proto na výběr obrovské množství výrobků, konstrukčních velikostí a typů. U standardního provedení se vstřikovací a uzavírací jednotka nacházejí na loži stroje (obr. 2.1). Používají se však také stroje se svisle pracujícími uzavíracími nebo vstřikovacími agregáty.

Ať už se jedná o moderní provedení lisu, či starší typ, lze celé výrobní zařízení teoreticky rozdělit do tří hlavních konstrukčních částí:

- Vstřikovací jednotka neboli extrudér
- Uzavírací jednotka, systém pro uzavírání formy
- Vstřikovací forma
- Řídicí systém stroje

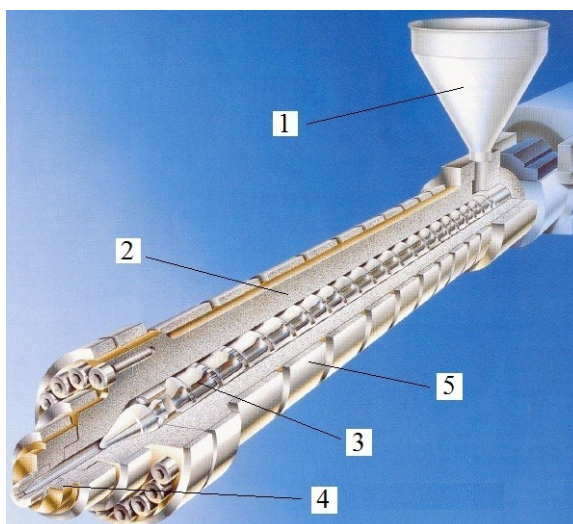


Obr. 2.1 Schéma vstřikovacího lisu

2.1.1 Vstřikovací jednotka

Úkolem vstřikovací jednotky je plastifikace plastu s vysokým výkonem při dobré viskozitní homogenitě a vstřikování plastu do nástroje včetně dotlaku.

Extruder na obrázku 2.2 tvoří vyhřívaný válec plastifikační komory **1**, do kterého je sypaná surovina skrz násypku **2** na začátku vytlačovací linky. Moderní vstřikovací lisy využívají šneku **3** otáčeného přímo hydraulickým motorem, hydraulickým motorem s převodem, nebo elektromotorem s převodem. Šnek nabírá materiál do plastifikační jednotky, zde se plastový granulát nahřeje na požadovanou teplotu $150 \div 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vlivem dekomprese zhutní a zbaví bublin. Po nahřátí v plastifikační jednotce je tekutý plast (tavenina) připraven pro vstříknutí do formy. Vstřikování pod vysokým tlakem až 250 MPa je vykonáváno v počáteční fázi otáčením šneku. Ve finále je však šnek tlačěn hydraulickým přímočarým motorem a funguje jako beran, který přes zpětný ventil doplní formu taveninou pod správným tlakem.



Obr. 2.2 Řez vstřikovací jednotkou

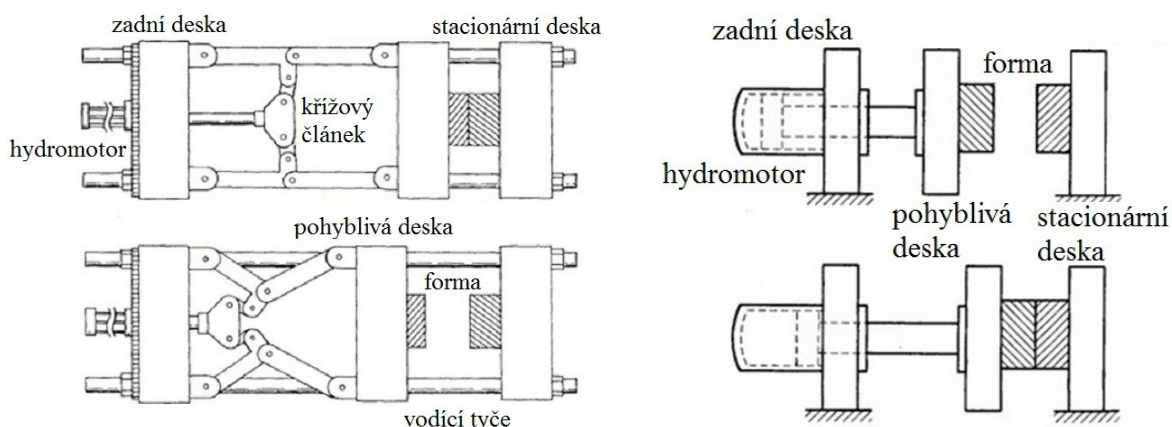
1 – násypka, 2 – válec extruderu, 3 – šnek, 4 – tryska, 5 – topné tělesa

Méně rozšířený způsob injekčního vstřikování tvoří dva separátní vyhřívané válce. První slouží k plastifikaci materiálu a plnění druhého válce, ten pak pomocí plunžru vstřikuje materiál přes trysku do formy.

2.1.2 Uzavírací jednotka

Funkcí uzavírací jednotky je přesné upnutí dvou částí formy vůči sobě. Jedna část formy je fixovaná na stacionární a druhá na pohyblivé desce lisu. Pohyblivá deska je vedená vodíci tyčemi. Jednotka musí udržet uzavřenou formu po celý proces tlakového vstřikování plastu a zajistit otevírání a uzavírání formy pro vyjmutí vylisku v odpovídajícím čase.

Pro splnění uvedených úloh jsou v současné době nabízeny dva různé uzavírací systémy. Uzavírací systémy hydromechanické (kloubové) mají v zásadě tu přednost, že zabrzdění uzavírací desky nastává automaticky krátce před uzavřením nástroje na základě kloubového systému (obr. 2.3). Kloubový systém se otevírá a zavírá rychleji než hydraulický uzavírací systém, naproti tomu hydraulické uzavírání formy s axiálně uloženým přímočarým hydromotorem (obr. 2.4) je konstruován pro uzavírací síly až několika tisíc tun.



Obr. 2.3 Pákový mechanismus uzavírání formy (vlevo), hydraulická uzavírací jednotka (vpravo)

Tlačným členem pákového mechanismu je přímočarý hydromotor, nebo kuličkový šroub řízený elektromotorem. Výhodou této konstrukce je velká rychlost pohyblivé desky při malém tlaku v první fázi pohybu. Ke konci zdvihu je tomu přesně naopak a tudíž má kloubový mechanismus přesně ty vlastnosti, které jsou k funkci uzavírání jednotky potřeba. Tento uzavírací mechanismus je však vhodný pouze pro nízkotónážní vstřikovací lisy.

Hydraulická uzavírací jednotka je flexibilnější než pákový systém v možnosti nastavení síly v dané pozici během zdvihu. Přímocharý hydromotor u tohoto typu působí

tlakem proti pohyblivé části formy, kde musí být říditelná jak jeho rychlost, tak přítlačná síla. U některých typů vstřikolisů zajišťují přítlak formy i čtyři hydromotory umístěné v každém rohu lože formy.

2.1.3 Vstřikovací forma

Forma je důležitá speciální část vstřikovacího stroje a je vyráběna na zakázku. Konstrukcí a výrobou vstřikovacích forem se zabývá mnoho nástrojařských firem. Podle typu výrobku může být dvou, tří nebo více desková. Forma má chladicí (temperační) dutiny, kde je hadicemi přivedena chladicí kapalina, většinou voda s nuceným oběhem. Po zavření obou polovin formy do sebe, se pohybem šneku uvnitř plastifikační jednotky vstříkne do formy vysokým tlakem (až 250 MPa) rozehrátý plast.

Pro správné odformování je nutné, aby během vstřikování materiálu unikly z formy všechny plyny. Po vstříknutí přijde na řadu nutný čas na chlazení formy. Formu je nutné chlazením udržovat na konstantní teplotě, bývá temperována na $20 \div 150$ °C, podle technologických požadavků. Poté se forma otevře a vypadne nebo je vyjmut hotový, vytvarovaný kus a celý proces se může opakovat. Pokud má forma více než jednu dutinu (lisování malých částí), pak se produkce násobí (obr. 2.4).



Obr. 2.4 Vstřikovací forma se čtyřmi dutinami

2.2 Termoplastické materiály

Plastické hmoty jsou pro vstřikování dodávány ve formě granulátu. Mohou být přírodní barvy, čiré, průhledné, nebo probarvené. V tabulce 2 je uveden přehled termoplastických materiálů, polymerů zpracovávaných metodou vstřikování. Seznam není nikterak úplný a chybí zde i množství kombinací materiálů, např. PC/ABS, vyvinutých k dosažení těch nejlepších vlastností jaké před tím měly dva odlišné materiály. Tak třeba pevnost lze zvýšit



v mnoha případech přidáním plniv, jako jsou mastek a sklo. Taktéž aditiva zlepšují UV stabilitu, ohnivzdornost, nebo zaručují antimikrobiální netečnost.

Tabulka 2 – Materiály zpracovávané vstřikováním

Materiál	Zkratka	Vlastnosti	Typické aplikace
Polypropylen	PP	Dobrá chemická odolnost	Balení, kontejnery
PP Homopolymer	HPPP	Trvalý, odolný	Domácí potřeby
PP Kopolymer	CPPP	Lesk, možná textura, nízká cena	Velké automobilové díly, plastové talíře a misky
Polyetylen	PE		
PE s nízkou hustotou	LDPE/LLDPE	Dobrá chemická odolnost, pevný, vodě odolný materiál, nízké teploty, netoxický, nízká cena	Materiál o vysoké hustotě – laboratorní nástroje, plyn/voda potrubí a spojky
PE s vysokou hustotou	HDPE		
Polystyren	PS	Křehký, transparentní, slabá UV stability. HIPS je až 7x pevnější než GPPS	hračky, balení, kosmetika, TV skříně, toaletní sedátka
PS-všeobecné užití	GPPS		
PS-vysoce odolný	HIPS		
Organické sklo	PMMA	Pevný, čistý lesklý, voděodolný	Čočky, světelné difuzéry
Akrylonitril-butadien-styren	ABS	Lesk, možná textura, nízká cena	Domácí aplikace, počítačové skříně
Nylon (Polyamid)	PA	Pevný a tuhý	Ložiska, vodící pouzdra, ozubená kola
Acetal	POM	Pevný a tuhý, dobré protiotěrové vlastnosti	Ventily, hydraulika
Polykarbonát	PC	Pevný a čirý materiál	Bezpečnostní přilby, štíty, světla aut, glazury
Akrylonitril-styren-akrylát	ASA	Pevný, dobrá odolnost UV záření	Ochranné desky
Styren-acrylonitril	SAN	Pevný, transparentní, odolnost proti lámání	Čočky, sklenice na pití, kuchyňské nádobí
Polyvinylchlorid	PVC	Tuhý, tvarová stálost, odolný vlivům počasí, nehoří, nevodivý	Izolace kabeláže, podlahy, hadice
Polyuretan	PUR	Flexibilní, čistý, nesmáčivý	Podrážky, těsnění, kola
Polyestery	PBT, PET	Extrémně pevný, tepelně odolný	PET lahve
Polysulfony	PES, PSU, PEEK	Excelentní odolnost vysokým teplotám, pevný, flexibilní	Mikrovlnné trouby, chirurgické nářadí

2.3 *Hydraulický pohon vstřikovacího lisu*

U pohonů vstřikovacích strojů rozlišujeme přímý pohon a systém s hydraulickým akumulátorem. U strojů s kloubovým uzavíracím systémem se pracuje obvykle principem přímého pohonu a u dvoustupňových hydraulických systémů se používá hydraulický akumulátor.

2.3.1 *Přímý pohon uzavírání formy*

U přímého pohonu hydrogenerátor zásobí přímo všechny spotřebiče potřebným množstvím oleje pro pojiždění, dávkování a vstřikování. Instalovaný výkon musí být dimenzován pro maximální jednotlivou spotřebu energie – většinou vstřikování, přičemž musí být zajištěno, aby předpokládaný výkon pokryl také spotřebu energie nutnou pro dávkování a pojiždění.

2.3.2 *Pohon s hydraulickým akumulátorem*

Hydrogenerátor „A“ plní akumulátor a pohání hydromotor v systému při maximálním tlaku. Často se využívá nízkotlakého hydrogenerátoru „B“ jako oběhového čerpadla pro chladič a filtraci oleje nebo je v případě potřeby využíváno volitelně k pohánění hydromotorů při malém tlaku. K naplnění akumulátoru je možno použít menší agregát, protože je k dispozici i čas mezi jednotlivými cykly.

Výkon hydraulického pohonu, který je třeba instalovat, se u systému s akumulátorem řídí většinou podle spotřeby energie pojiždění a dávkování, a je tedy menší než u přímého pohonu. Díky systémům s akumulátorem lze dosáhnout nízkých instalovaných příkonů a tedy nízké spotřeby energie.

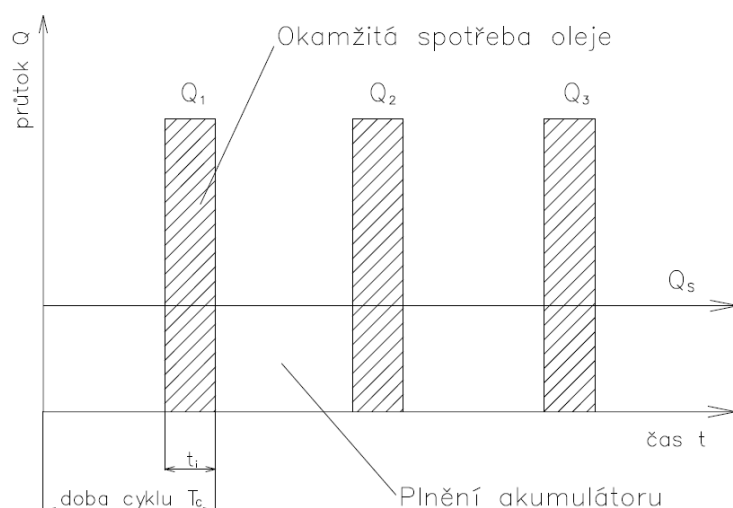
Navrhujeme-li zdroj tlaku pro pokrytí nerovnoměrného, avšak periodicky se opakujícího odběru dle odběrového diagramu (obr. 2.5), pak volíme hydrogenerátor s průtokem Q_s :

$$Q_s = \frac{\sum Q_i \cdot t_i}{T_c} \quad (2.1)$$

Kde: Q_i jednotlivé průtoky [m^3s^{-1}]

t_i doby odběrů (průtoků) [s]

T_c celková doba cyklu [s]



Obr. 2.5 Dimenzování hydrogenerátoru u systému s akumulátorem

Q_i – jednotlivé průtoky, t_i – doby odběrů (průtoků), T_c – celková doba cyklu, Q_s – střední průtok

2.4 Řízení a kontrola procesních parametrů

K zabránění výroby vadných dílů se nabízí několik možností již v řízení strojů, např. kontrolou procesních parametrů, které mají vliv na jakost výstřiku.

Strojní parametry	Procesní parametry
Otáčky šneku	Tlak ve formě
Hydraulický tlak	Teplota hmoty ve formě
Teplota taveniny pod čelem šneku	Teplota stěn formy
Polštář ⁽¹⁾	Rychlost proudu materiálu ve formě
Rychlost vstřikování	Specifický objem
Uzavírací síla	Hustota ztuhnuté okrajové vrstvy
Čas, dráha	

Všechny tyto parametry ovlivňují více či méně tvarovaný kus. Aby se neustále vyráběly dobré kusy, je třeba tyto parametry kontrolovat a/nebo regulovat:

Regulované parametry	Kontrolované parametry
Otáčky šneku	Tlak (a jeho průběh) ve formě
Vstřikovací tlak	Hydraulický tlak (a jeho průběh)
Rychlost vstřikování	Polštář
Uzavírací síla	Vstřikovací rychlost
Teploty trysky a pásem vstřikovacího válce	Přepínací tlak
	Tlakový integrál

(1) Polštář hmoty = určitý objem plastu, na který bude šnek působit svým čelem při dotlačení

3. Návrh alternativních řešení hydraulického řízení uzavírání formy

3.1 Zadané parametry lisování

Při modernizaci vstřikolisu *Ferromatik F110* byly zadány nové strojní parametry rychlosti pohybu hydromotoru a přítlačné síly uzavírání formy (tabulka 3). Dráha otevření formy je dána rozměrem výstřiku ve směru otevírání formy a musí být tak velká, aby bylo možno výrobek z formy vyjmout, případně aby bylo dost prostoru pro činnost manipulátoru ve formě. Je snaha zkrátit strojní časy na minimum a toho se dá dosáhnout zvýšením rychlosti pohybující se formy. U moderních strojů není tato rychlost po celé dráze stejná, nýbrž při zavírání se forma z počátku pohybuje velkou rychlostí, avšak těsně před dosednutím formy se rychlost sníží, aby obě části formy na sebe dosedly měkce a forma se nárazem nepoškodila. Říkáme tomu „ochrana formy“.

Proto je nutné do obvodu zakomponovat prvky pro řízení průtoku kapaliny a zároveň pro řízení tlaku. Další nutností je prvek pro snímání polohy hydromotoru. Řídící elektronika bude na vstřikovacím lisu uložena ve skříni řízení.

Tabulka 3 – Požadované parametry lisu

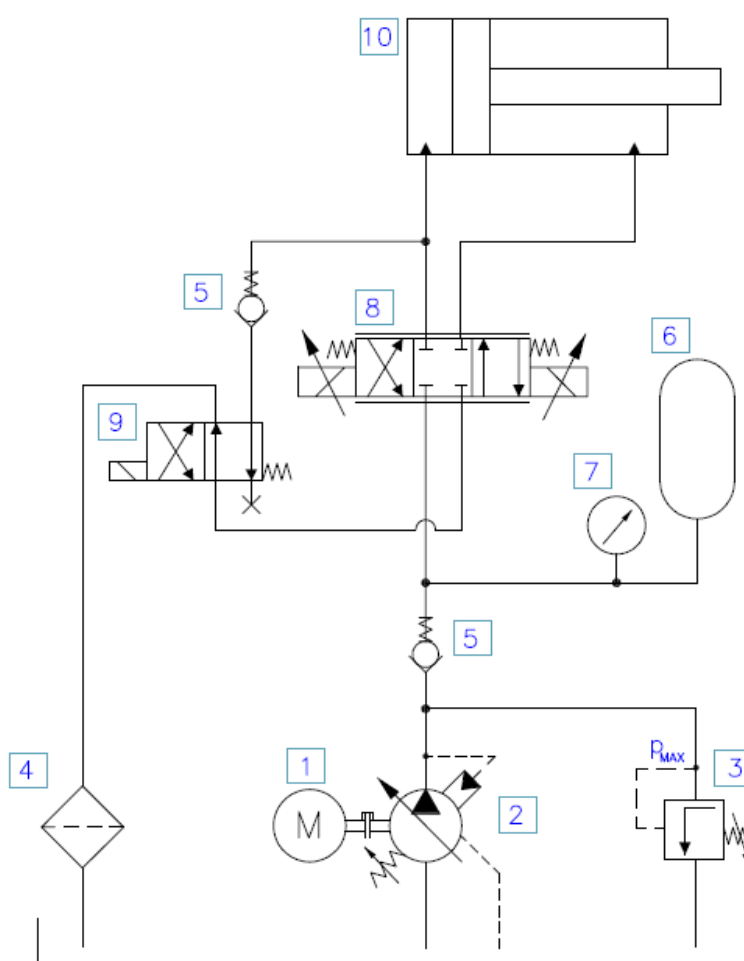
Režim lisování	Max. síla	Rychlost
1. Uzavírání – rychloposuv	$F_1 = 30 \text{ kN}$	$v_1 = 0,680 \text{ m s}^{-1}$
2. Uzavírání – mikroposuv „ochrana formy“	$F_1 = 30 \text{ kN}$	$v_2 = 0,027 \text{ m s}^{-1}$
3. Dovření formy	$F_2 = 1050 \text{ kN}$	0 m s^{-1}
3. Otevírání	$F_3 = 51 \text{ kN}$	$v_3 = 0,385 \text{ m s}^{-1}$
4. Otevírání – diferenciální zapojení	$F_4 = 23 \text{ kN}$	$v_4 = 0,870 \text{ m s}^{-1}$
Max. otevření formy (zdvih hydromotoru)	$0,45 \text{ m}$	
Hmotnost přítlačné desky $0,59 \times 0,59 \times 0,14 \text{ m}$	382 kg	
Hmotnost poloviny lisovací formy	$200 \div 400 \text{ kg}$	
Nepřetržitý provoz	24 hod/den	

U obou variant bude sestávat hydraulické zařízení vstřikolisu z následujících uzlů:

- Nádrž s příslušenstvím
- Pohonná jednotka
- Hydropneumatický akumulátor s příslušenstvím
- Ovládací blok uzavírání formy
- Potrubní rozvod
- Hydromotor

3.2 *Hydraulický obvod s regulačním hydrogenerátorem, diferenciálním hydromotorem a akumulátorem*

U obou zamýšlených variant je hydraulický agregát kompaktní celek tvořený nádrží s pohonnou jednotkou a rozváděcím blokem. Příslušenství nádrže tvoří plnicí filtr, stavoznak, snímač teploty a hladiny, odpadní filtr. Pohonná jednotka je tvořena elektromotorem spojeným přes spojku s hydrogenerátorem.

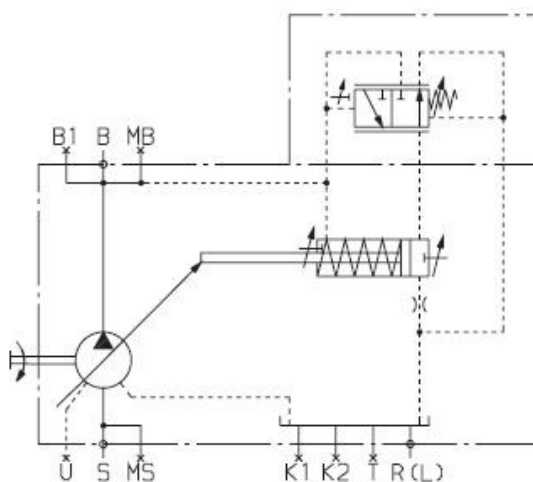


Obr. 3.1 Základní hydraulické schéma řízení lineárního pohonu uzavírání formy

1 – elektromotor, 2 – hydrogenerátor s regulací na konstantní tlak, 3 – pojistný ventil, 4 – filtr, 5 – zpětný ventil, 6 – akumulátor, 7 – manometr, 8 – proporcionální rozváděč, 9 – dvoupolohový čtyřcestný elektricky ovládaný rozváděč, 10 – hydromotor

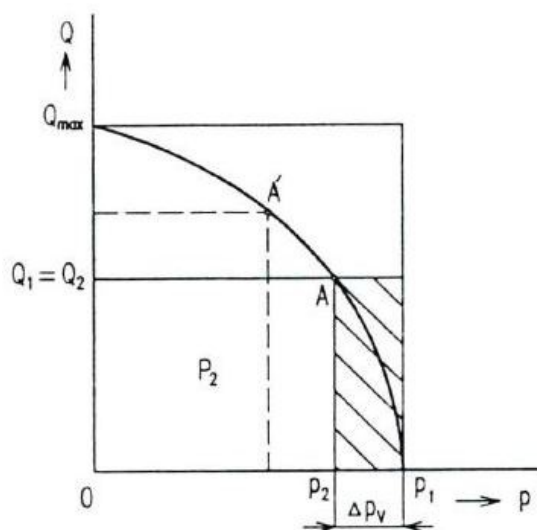
3.2.1 Složení hydraulického obvodu

Na obr. 3.1 je navržené schéma hydraulického obvodu řešeného zařízení. Pohonná jednotka je tvořena elektromotorem **1** a regulačním hydrogenerátorem **2** s regulací na konstantní tlak (obr. 3.2). Proti přetížení je pohonná jednotka jištěná pojistným ventilem **3**. Za zpětným ventilem **5** je paralelně připojen akumulátor **6**, dále je hlavní řídicí člen, jímž je proporcionálně řízený rozváděč **8**, který vstupním řídicím proudem kontroluje průtok a tedy rychlost hydromotoru **10** v obou směrech pohybu. Prostřednictvím rozváděče **9** je zde uskutečněno diferenciální zapojení, které lze využít při rychloposuvu. Pro diferenciální zapojení musí být rozváděč **9** v sepnuté poloze.



Obr. 3.2 Hydrogenerátor s regulací na konstantní tlak - schéma

3.2.2 Energetická bilance obvodu s hydrogenerátorem s regulací na konstantní tlak



Obr. 3.3 Diagram energetické bilance

Q_1 – vstupní průtok, Q_2 – výstupní průtok, Δp_V – tlakový spád na škrticím ventilu, A – pracovní bod, P – výkon systému

Účinnost systému η je dána vztahem:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - P_{z1}}{P_1} = \frac{Q_2 \cdot p_2}{Q_1 \cdot p_1} = \frac{p_2}{p_1} = \frac{p_2}{p_2 + \Delta p_v} \quad (3.1)$$

U systému s regulačním hydrogenerátorem s regulátorem na konstantní tlak a škrticím ventilem lze dosáhnout účinnosti až $\eta = 0,667$. Takto počítaná účinnost je jen teoretická, bez uvažování hydraulických ztrát v obvodu.

3.2.3 Popis funkce obvodu a řízení

Hydrogenerátor **2** (obr. 3.1) dodává tlakovou kapalinu do hydromotoru **10**. Směr i velikost průtoku určuje zdvih kotvy elektromagnetu a tím tedy i šoupátka proporcionálního rozváděče **8**, jež je přímoúměrný protékajícímu proudu. Zařazení regulačního hydrogenerátoru je z energetického hlediska optimální řešení, jak zajistit zdroj konstantního tlaku pro řízení proporcionálním rozváděčem.

Velmi rychlé regulační ventily, například proporcionální rozváděč 4 WRTE (Bosch Rexroth) světlosti Dn 16 řízený na prvním stupni lineárním motorem, mají dobu přestavení při 100% signálu 25 ms. Kdežto doba přestavení regulačního hydrogenerátoru je delší, okolo 120 ms.

Pokud řídíme průtok do hydromotoru rychlým proporcionálním ventilem, použijeme jako zdroj tlaku hydrogenerátor s regulací na konstantní tlak a paralelně připojený akumulátor **6**, který zde slouží jako dočasný zdroj tlaku.

3.3 *Hydraulický obvod uzavírání formy s regulačním systémem SYDFE a sdruženým hydromotorem*

Kompletní hydraulické schéma – výkres číslo 2011-KOV409-01

Specifikace prvků – příloha číslo 2011-KOV409-02

3.3.1 Popis funkce hydraulického obvodu

Pohonná jednotka je tvořena elektromotorem **20** a axiálním pístovým hydrogenerátorem série A10VSO...DFE1 **22**, pracující v režimu $\Delta p = \text{konst.}$ Jedná se o hydrogenerátor s elektronickou regulací tlaku, řízený regulačním systémem SYDFE

s uzavřenou smyčkou, jehož parametry se nastavují prostřednictvím regulační karty VT5041-2X. Systém zaručuje rychlé získání požadovaného průtoku a tlaku přesně dle požadavku stroje. Celková účinnost je vysoká díky omezení energetických ztrát na škrticím prvku a vysoké opakovatelnosti kontroly.

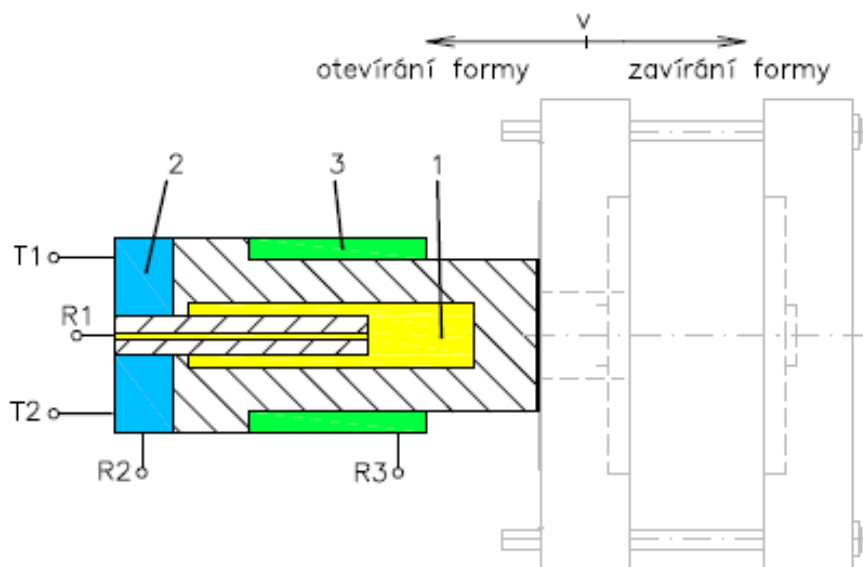
Tlak z pohonné jednotky na rozváděcí blok **30** je odstavován rozvaděčem **31**, který je osazen snímačem polohy šoupátka SQ1. Pojistný ventil proti přetížení obvodu není při použití elektronické regulace SYDFE potřebný. Pohyb otevírání i zavírání formy je realizován rozvaděčem **33** s proporcionálním elektromagnetem YP2. Aktivováním logického vestavného ventilu **35**, ovládaného rozvaděčem **37.1**, je plněn kapalinou hlavní lisovací prostor hydromotoru kanálem R2. Tak je dosaženo největší přítlačné síly na formě ve fázi vstřikování plastu a také dokonalé těsnosti díky sedlovému provedení.

Ve druhé fázi otevření formy se používá diferenciálního zapojení pomocí rozvaděče **32**. Tímto propojením umožníme rychlému naplnění prostoru válce kanálem R3 vytlačovanou kapalinou z kanálu R1. Sací ventily **45** ve větvi T1 a T2 se otevírají pomocí rozvaděče **34**. Těch je využito k nasátí kapaliny do hydromotoru při fázi uzavírání – rychloposuvu a k vyprazdňování při fázi otevírání formy. Hydromotor je mechanicky svázán s kontinuálním snímáním polohy pravítkem BQ3, prvky **46** a **47**. Tlak v lisovacím prostoru hydromotoru je snímán tlakovými snímači BP2 a BP3 **38** na vstupu do hydromotoru.

Toto navržené schéma obsahuje i samostatnou oběhovou jednotku s filtrem **9** a tepelným výměníkem **5**. Cirkulaci kapaliny zajišťuje zubový hydrogenerátor **12**. Oběhový filtr **9** s jemností filtrace 7 µm je osazen snímačem zanesení SP2. Dále následuje vodní chladič **5** osazený na vstupu chladicí vody solenoidovým ventilem **6**.

Samotný uzávěr formy je realizován dvoučinným sdruženým hydromotorem se třemi prostory (obr. 3.5), který má tyto významné přednosti:

- Konstrukčně zkrácená doba zavírání formy. Při rychloposuvu je přívodem R1 plněna komora 1 s malým geometrickým objemem a není tudíž potřebný říliš velký průtok kapaliny.
- Malá spotřeba hydraulického oleje, tomu odpovídá malý objem nádrže a nízká spotřeba energie.
- Hydromotor je vybaven dvěma sacími kanály, které umožňují rychlé doplnění komory 2 kapalinou přivedenou přívodem R2 při rychloposuvu.
- Vysoké otevírací síly, jednoduchá údržba.



Obr. 3.5 Sdružený hydromotor

R1 – přívod pro uzavírání formy, R2 – přívod dovození lisovacího prostoru formy, R3 – přívod posuvu od formy, T1, T2 – přívody sání do prostoru 2, v – rychlost pohybu formy

3.4 Porovnání jednotlivých variant, vyhodnocení

Jako kritéria pro zhodnocení jednotlivých variant hydraulických obvodů jsou nejdůležitější především energetická úspornost, přesnost a citlivost řízení, náročnost na provoz údržbu, dynamika systému.

– Předpokládaná energetická účinnost (úspornost)

Zdrojem tlakové kapaliny obou mých návrhů je hydrogenerátor s regulací na konstantní tlak. Druhý návrh je poháněn pístovým hydrogenerátorem s elektronickou regulací tlaku SYDFE, který je společností Bosch-Rexroth přímo doporučen pro aplikaci u lisařských strojů. Tento systém považuji za nejvyspělejší řešení a nejlepší volbu z hlediska úspornosti u zařízení, jenž je provozováno v nepřetržitém provozu. Sdružený hydromotor se třemi prostory je také úsporným řešením díky malé spotřebě hydraulického oleje a tomu odpovídající nízké spotřebě energie.

– Přesnost a citlivost řízení

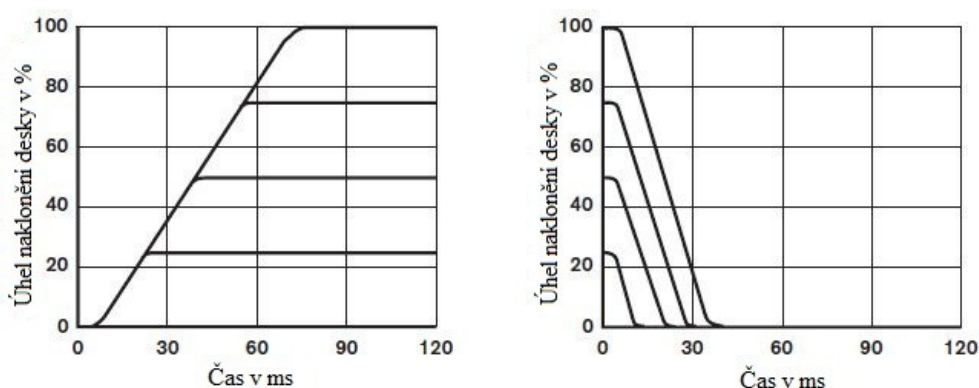
I když lze pomocí uzavřené smyčky regulačního systému SYDFE kontrolovat současně provozní tlak i dodávaný průtok, byl do obvodu začleněn pro řízení průtoku

proporcionální rozváděč. Moderní stroje vyžadují vysokou přesnost a citlivost řízení a také velmi rychlou odezvu na řídicí signál, $40 \div 60$ ms (obr. 3.5). Objemové řízení průtoku změnou geometrického objemu hydrogenerátoru není pro použití zavírání formy vstřikolisu vhodné řešení, časy přestavení jsou řádově dvakrát delší.

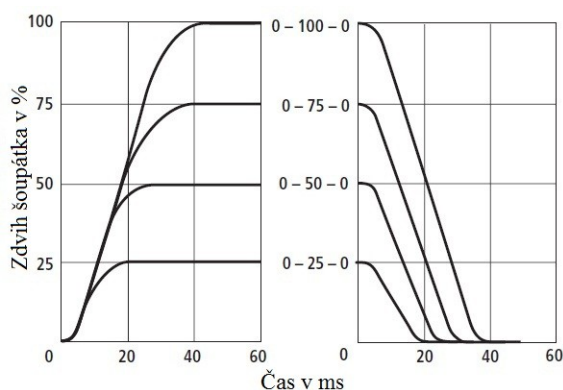
– *Dynamika systému*

I když jsou proporcionální rozvaděče dynamicky pomalejší než servoventily, pro řízení hydromotoru lisu jsou naprosto vyhovující. Ve spojení s řídicí elektronikou se dá jednoduše realizovat plynulý rozběh a brzdění hydromotoru a připojené zátěže. Požadovaný průběh rychlosti při rozběhu a brzdění se naprogramuje na elektronické kartě jako průběh řídicího napětí. Z dynamických charakteristik uvádějí výrobci frekvenční charakteristiky a přibližné přechodové charakteristiky v závislosti na velikosti a změně řídicího signálu.

Přechodová charakteristika hydrogenerátoru A10VSO100 s regulačním systémem SYDFE:



Obr. 3.4 Čas naklonění desky hydrogenerátoru při tlaku $p = 50$ bar



Obr. 3.5 Přechodová charakteristika proporcionálního přímo řízeného rozváděče 4WREE, NS10

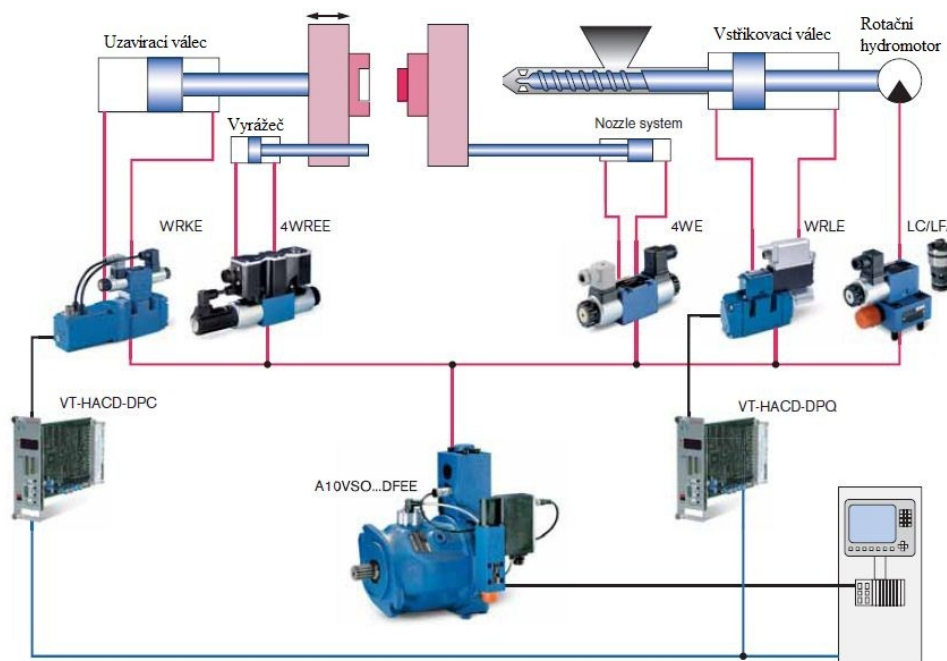
Regulační hydrogenerátor, jako zdroj tlaku, zapojený v kombinaci s proporcionálním rozvaděčem, nemůže mít pomalejší čas reakce na řídicí signál než rozvaděč. Z toho důvodu, nechceme-li začlenit do obvodu akumulátor, musíme naprogramovat čas rozběhu a brždění hydromotoru tak, aby byl delší než čas přestavení šoupátka v řízení hydrogenerátoru, viz. kapitola 6.5.

– *Náročnost na provoz a údržbu*

Moderní proporcionální hydraulika neklade speciální nároky na čistotu kapaliny oproti klasickým prvkům. Doporučuji jako provozní kapalinu minerální olej ISO VG46, max. znečištění dle ISO 4406 (1999) 18/16/13 a jemnost filtrae 5 μ m.

Ve druhém návrhu hydraulického obvodu jsem využil výhodného konstrukčního uspořádání sdruženého hydromotoru a zároveň i všech předností regulačního pístového hydrogenerátoru, které již byly popsány v předchozích kapitolách. Do obvodu nebude oproti první variantě začleněn akumulátor ani pojistný ventil.

Z toho důvodu považuji návrh číslo 2 za nejvýhodnější uživatelské řešení bez ohledu na počáteční vstupní náklady, které pro diplomovou práci nejsou relevantní. V další části diplomové práce se zaměřím na sestavení elektrohydraulického obvodu z prvků, které byly primárně navrženy společností Bosch-Rexroth pro injekční vstřikovací lisy (obr. 3.6).



Obrázek 3.6 Univerzální systémové řešení vstřikovacího lisu navržené společností Bosch Rexroth

4. Hdraulické funkční schéma pro řízení průtoků hydromotoru

Kompletní hydraulické schéma – výkres číslo 2011-KOV409-01

4.1 Spínací frekvence hydraulického obvodu

Uzavírání formy: 1. rychloposuv, 2. mikroposuv

<i>Prvek</i>	<i>Poz.</i>	<i>Solenoid</i>	<i>Stav</i>	<i>Funkce prvku</i>
Vstupní ventil	31	YV2	1	Otevření přívodního kanálu do rozvodné kostky
Proporcionální rozváděč	33	YP2	0 ÷ +10 V	Řízení průtoků kanálem R1
Rozváděč	34	YV4	1	Otevření hydr. zámků v sacím potrubí T1 a T2
Ventil dekomprese	37.2	YV5	1	Uzavřen

Rychloposuv i mikroposuv, tzv. „ochrana formy“, mají stejnou spínací frekvenci solenoidů. Rychlost uzavírání je tedy řízena proporcionálně, řídicím signálem v rozsahu od 0 do +10 V, díky nastavení rampové funkce na řídicí kartě. Pohyb, při kterém není zapotřebí velká síla přtlaku formy, je vyvozen tlakováním duté pístnice s pístem o průměru d_I (obr. 6.1). Pro dosažení maximální požadované rychlosti $0,68 \text{ m s}^{-1}$ tak není zapotřebí velkého průtoků kapaliny. Poslední milimetry fáze uzavírání formy ($20 \div 40 \text{ mm}$) se má forma uzavírat pomalu, rychlostí $0,027 \text{ m s}^{-1}$.

3. Dovření formy

<i>Prvek</i>	<i>Poz.</i>	<i>Solenoid</i>	<i>Stav</i>	<i>Funkce prvku</i>
Vstupní ventil	31	YV2	1	Otevření přívodního kanálu do rozvodné kostky
Logický ventil	37.1	YV5	1	Tlakování hydromotoru kanálem R2
Ventil dekomprese	37.2	YV5	1	Uzavřen

Po opatrném uzavření formy je zapotřebí zajistit velkou přtláčnou sílu 1050 kN při „nulové“ rychlosti pístu. Té dosáhneme díky otevření logického ventilu ovládaného rozváděčem 37.1. Napouštíme tak prostor hydromotoru s největší plochou mezikruží S_2 (obr. 6.1), pomocí kanálu R2, ale jen po dobu, dokud nenaroste tlak na snímači BP2 na požadovanou mez.

4. Dekompresa uzavíracího válce

<i>Prvek</i>	<i>Poz.</i>	<i>Solenoid</i>	<i>Stav</i>	<i>Funkce prvku</i>
Ventil dekomprese	37.2	YV5	0	Otevřen

Deaktivace (otevření) ventilu dekomprese **37.2** uzavíracího válce trvá tak dlouho, dokud není tlak v uzavíracím válci na snímači BP2 menší, než zadaný. Parametr dekompresního tlaku se zadává v operátorském panelu.

5. Otevírání formy

<i>Prvek</i>	<i>Poz.</i>	<i>Solenoid</i>	<i>Stav</i>	<i>Funkce prvku</i>
Vstupní ventil	31	YV2	1	Otevření přívodního kanálu do rozvodné kostky
Proporcionální rozváděč	33	YP2	$0 \div -10 \text{ V}$	Řízení průtoku kanálem R3
Rozváděč	34	YV4	1	Otevření hydr. zámků v odpadním potrubí T1 a T2

Otevírání formy kanálem R3 je řízeno proporcionálním rozváděčem **33**, řídicím napětím $0 \div -10 \text{ V}$. Současně pro vypouštění kapaliny z prostoru mezikruží S_2 jsou otevřeny hydraulické zámky **45** ve větvích T1 a T2. Dráha otevření formy je snímána pravítkem BQ3 a je předem nastavená v operátorském panelu dle velikosti formy.

6. Otevírání formy – diferenciální zapojení

<i>Prvek</i>	<i>Poz.</i>	<i>Solenoid</i>	<i>Stav</i>	<i>Funkce prvku</i>
Vstupní ventil	31	YV2	1	Otevření přívodního kanálu do rozvodné kostky
Proporcionální rozváděč	33	YP2	$0 \div -10 \text{ V}$	Řízení průtoku kanálem R3
Rozváděč	34	YV4	1	Otevření hydr. zámků v odpadním potrubí T1 a T2
Rozváděč	32	YV3	1	Otevření ventilu diferenciálního zapojení (R1→R3)

Diferenciální zapojení hydromotoru je uplatňováno ve druhé fázi zasouvání hydromotoru rychlostí $0,87 \text{ m s}^{-1}$. Propojením kanálů R1 a R3 dosáhneme zrychlení pohybu pístnice tak, že kapalina proudící kanálem R1 není svedena do nádrže, ale je přepuštěna do prostoru mezikruží S_3 .

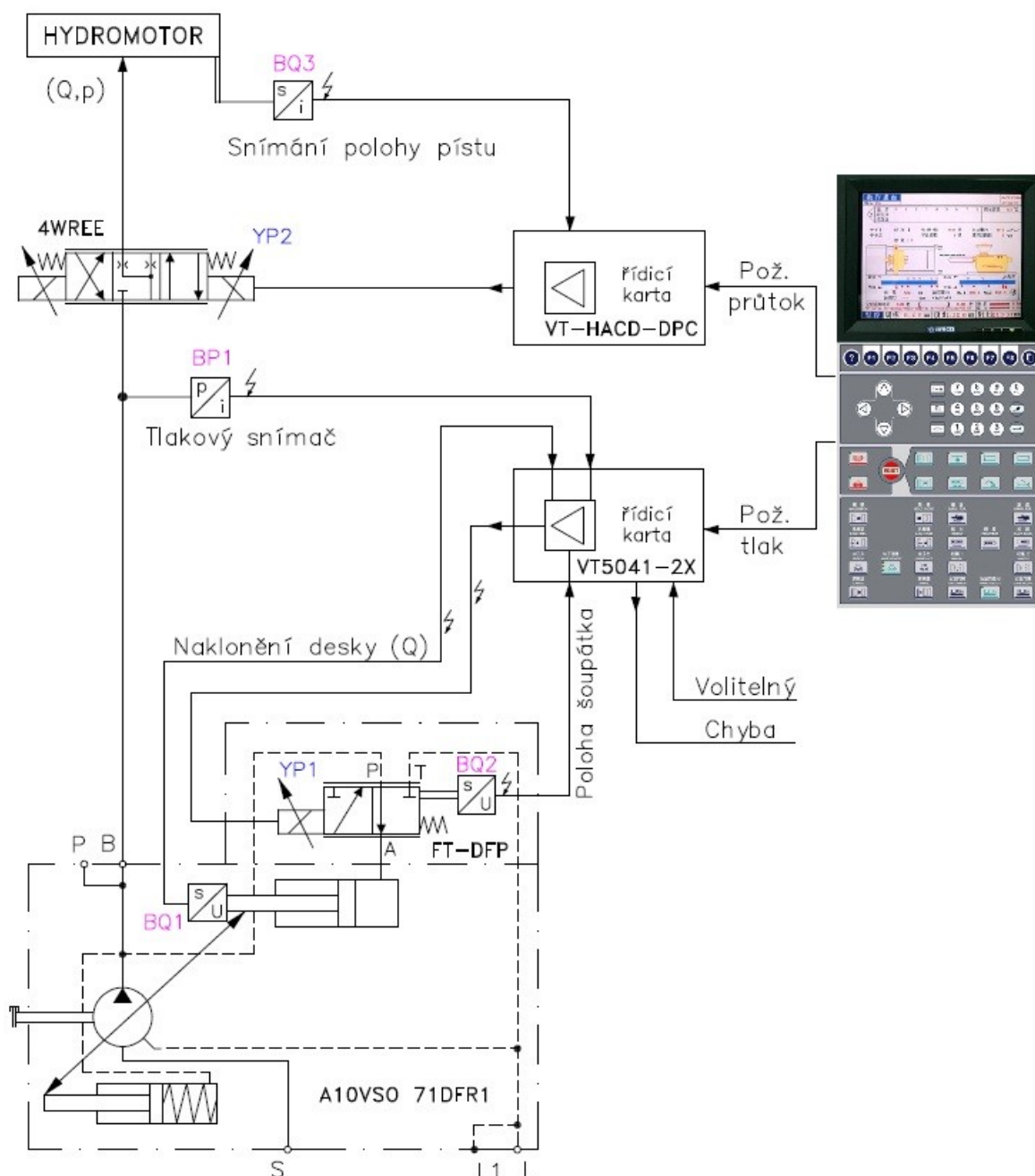
4.2 *Řízení oběhové jednotky, teplotní stabilizace*

Na víko hydraulické nádrže budou umístěny celkem tři snímače teploty kapaliny, které signalizují na řídicím panelu podle přednastavené teploty: ST1 = 40°C, ST2 = 50°C a ST3 = 60°C (poz. 3.1 až 3.3).

Provozní teplota oleje je udržována mezi 40°C a 50°C dvěma termostaty ST1 a ST2. Je-li teplota vyšší než 50°C (ST2 = 1) uvádí se v činnost chlazení, sepnutím solenoidového ventilu **6**. Chladicí proces setrvává, dokud teplota oleje v nádrži neklesne pod 40°C. Při překročení 60°C (ST3 = 1) systém hlásí „havarijní teplotu“ a hlavní pohonná jednotka se blokuje. Nadále je však v provozu oběhová jednotka, současně s otevřeným solenoidovým ventilem **6**, kdy chladicí voda ochlazuje olejovou náplň.

5. Základní návrh regulačního systému pro přesné polohově-tlakové řízení přímočarého hydromotoru

Regulační schéma na obrázku 5.1 je sestaveno z prvků navržených v hydraulickém funkčním schématu 2011-KOV409-01, včetně prvků pro snímání polohy a tlaku.

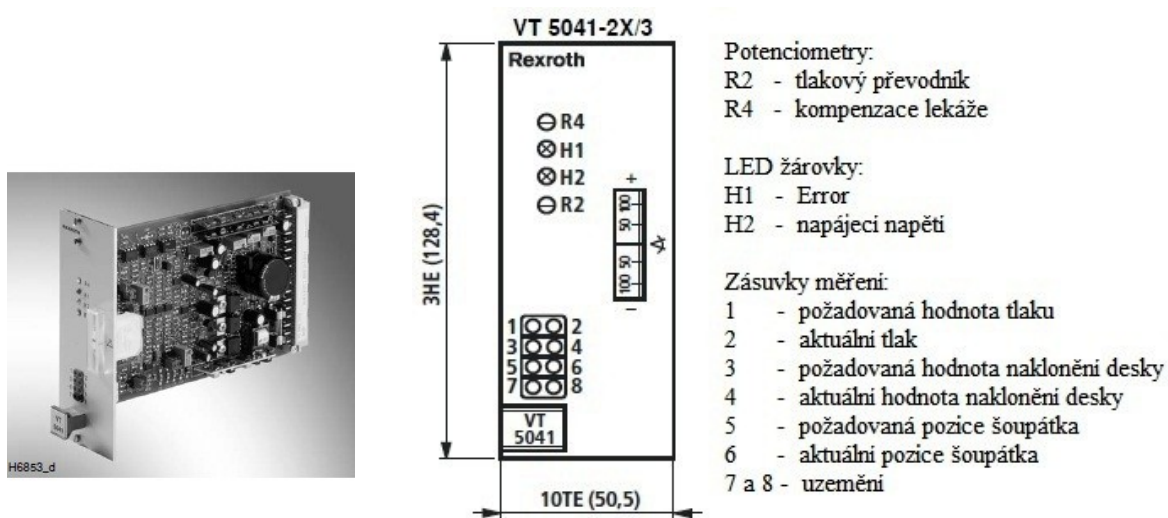


Obr. 5.1 Schéma regulačního systému polohově-tlakového řízení hydromotoru

5.1 Elektrohydraulický regulační systém pohonu hydromotoru

Podmínkou provozu hlavní pohonné jednotky je chod oběhové jednotky a splnění všech provozních stavů (provozní teplota, dostatečná hladina kapaliny). Hlavní pohonná jednotka obsahuje regulační čerpadlo A10VSO...DFE1, prostřednictvím kterého se nastavuje provozní tlak v systému. Tyto parametry se programují v operátorském panelu pro jednotlivé sekvence chodu vstřikolisu. Zadané parametry se zpracují na regulační kartě VT5041-2X, která je vybavena analogovými vstupy BP1, BQ1, BQ2 a výstupy YP1 pro akční člen regulace čerpadla (obr. 5.1).

Řídicí karta VT5041-2X náležící do systému SYDFE, zpracovává všechny vstupní signály v uzavřené smyčce nutné pro regulaci pístového hydrogenerátoru s proměnným objemem A10VSO...DFE1. Řídí pilotní proporcionální 3/3 rozváděč VT-DFP-2X se zabudovaným převodníkem polohy šoupátka pro zpřesnění regulace. Karta je koncipovaná jako zástrčný modul Euro-formátu.



Obr. 5.2 Řídicí karta VT5041-2X

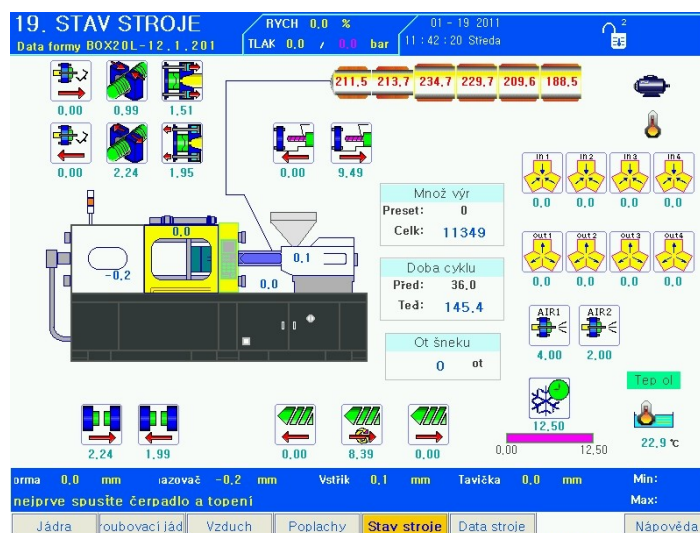
Elektrohydraulická regulace pracuje s elektrickými řídicími signály řádově v mA a je velmi přesná. Drobná nestabilita a nepřesnost se pohybuje v desetinách procent:

Tabulka 4 – Přesnost řízení uzavřenou smyčkou systémem SYDFE

	Naklonění desky	Tlak
Linearita	$\leq 1.0\%$	$\leq 1.5\%$
Teplotní drift	$\leq 0.5\% / 10\text{ K}$	$\leq 0.5\% / 10\text{ K}$
Hystereze	$\leq 0.2\%$	$\leq 0.2\%$
Opakovatelnost	$\leq 0.2\%$	$\leq 0.2\%$

Rychlost uzavírání válce řídí karta VT-HACD-DPC (obr. 5.1) pomocí zpětné polohové vazby od hydromotoru. Karta je součástí proporcionálního rozváděče série 4WREE a byla navržena přímo pro řízení uzavírání lisářských strojů. Zajišťuje hladký rozběh formy na požadovanou rychlost a dokonce je zde i samostatný výstup pro indikaci úplného uzavření formy.

Nedílnou součástí všech automatizačních systémů je řešení rozhraní mezi člověkem a řídicím systémem. Zobrazovací a obslužný systém (obr. 5.3) je uložen pevně ve stroji a je u něj v popředí zájmu optimální způsob obsluhy pro operátora a ergonomie. Čím více je periferních zařízení připojeno ke vstřikovacímu stroji, tím vyšší jsou požadavky na pohodlnou obsluhu. Moderní panelová PC jsou dnes samozřejmostí, z nabídek lze vybírat z celé skupiny průmyslových LCD monitorů.



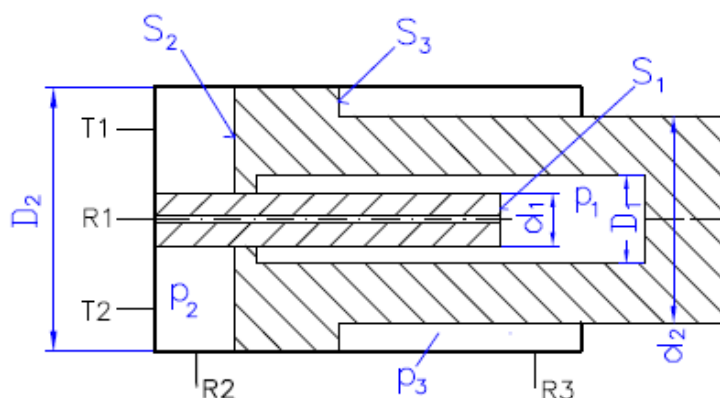
Obr. 5.3 Zobrazovací systém stavu stroje (lisovací stroj společnosti Fatra Chropyně)

Vlastní řídicí systém je uspořádán ve skříňovém rozváděči stroje a je spojen přes sériové nebo paralelní rozhraní s obslužnou částí. K ukládání dat nastavení kompletní výrobní buňky nebo stroje samotného je v obslužné části operátora k dispozici vyměnitelný paměťový modul (disketa 3 1/2“, magnetická páska, polovodičové moduly).

6. Výpočet statických a dynamických parametrů pohonu, včetně stanovení parametrů přímočarého hydromotoru

Při výpočtu hydromotoru vycházím z konceptu řešení původního sdruženého hydromotoru se třemi prostory. Celkový požadovaný zdvih hydromotoru je 450 mm.

6.1 Výpočet rozměrů pístu a pístnice přímočarého hydromotoru



Obrázek 6.1 Silové poměry přímočarého hydromotoru

S_1, S_2, S_3 – plocha pístu, d_1, d_2 – průměr pístnice, D_1 – vrtání pístnice, D_2 – průměr válce, p_1, p_2 a p_3 – tlak v komoře hydromotoru

Zvolím pracovní tlak $p_{M1} = 12 \text{ MPa}$ pro všechny operace mimo fázi dovření, kdy volím tlak vyšší $p_{M2} = 17 \text{ MPa}$ a vypočítám potřebné rozměry pístu a pístnice hydromotoru D_1, D_2, d_1 a d_2 .

Potřebná plocha pístu S'_1 :

$$S'_1 = \frac{F_1}{p_{M1}} = \frac{30000}{12 \cdot 10^6} = 25 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (6.1)$$

Průměr pístu d_1 :

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 25 \cdot 10^{-4}}{\pi}} = 0,0564 \text{ m} \quad (6.2)$$

Potřebná plocha pístu (mezikruží) S'_2 :

$$S'_2 = \frac{F_2}{p_M} = \frac{105000}{17 \cdot 10^6} = 61,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (6.3)$$

Průměr pístu D_2 :

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi} + d_1^2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 61,7 \cdot 10^{-3}}{\pi} + 0,0564^2} = 0,2861 \text{ m} \quad (6.4)$$

Plocha pístu (mezikruží) S'_3 :

$$S'_3 = \frac{F_3}{p_M} = \frac{51000}{12 \cdot 10^6} = 42,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (6.5)$$

Průměr pístnice d_2 :

$$d_2 = \sqrt{D_2^2 - \frac{4 \cdot S_3}{\pi}} = \sqrt{0,2861^2 - \frac{4 \cdot 42,5 \cdot 10^{-4}}{\pi}} = 0,2764 \text{ m} \quad (6.6)$$

Tabulka 3 – Shrnutí rozměrů hydromotoru

Průměr pístu	D_2 [m]	0,28
Průměr pístnice	d_2 [m]	0,27
Průměr statického pístu	d_1 [m]	0,056
Průměr komory v pístnici	D_1 [m]	0,13
Síla stěny válce	s_v [m]	0,03
Délka zdvihu	l [m]	0,45

6.2 Kontrola bezpečnosti rozměru pístnice

Průměr vrtání pístnice: $D_1 = 0,13 \text{ m}$

Materiál pístnice je ocel 11 500 dle ČSN

Kritické napětí $\sigma_{KR} = 336 - 0,62 \cdot \lambda$

Moment setrvačnosti průřezu pístnice (mezikruží d_2/D_1) J_p :

$$J_p = \frac{\pi}{64} \cdot (d_2^4 - D_1^4) = \frac{\pi}{64} \cdot (0,27^4 - 0,13^4) = 24,68 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4 \quad (6.7)$$

Plocha průřezu pístnice S_m :

$$S_m = \frac{1}{4} \pi \cdot (d_2^2 - D_1^2) = \frac{1}{4} \pi \cdot (0,27^2 - 0,13^2) = 0,04398 \text{ m}^2 \quad (6.8)$$

Poloměr setrvačnosti plochy průřezu pístnice:

$$i = \sqrt{\frac{J_p}{S_m}} = \sqrt{\frac{24,68 \cdot 10^{-5}}{0,04398}} = 0,0749 \text{ m} \quad (6.9)$$

Poměrná štíhlost pístnice λ :

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{0,45}{0,0749} = 6 \quad (6.10)$$

Protože štíhlost $\lambda < 40$, není nutné kontrolovat pístnici na vzpěr. Provedu kontrolu na prostý tlak a tah.

Maximální napětí σ_{Vmax} v pístnici při maximální zatěžující tlakové síle F :

$$F = F_S + F_D = F_S + m_c \cdot a = 1100000 + 901 \cdot 3,4 = 1103063 \text{ N} \quad (6.11)$$

Kde: F_S statická složka síly [N]

F_D dynymická složka síly [N]

m_c celková hmotnost pohyblivé soustavy [kg]

a zrychlení hydromotoru [ms^{-2}]

Maximální napětí σ_{Vmax} :

$$\sigma_{Vmax} = \frac{F}{S_m} = \frac{1103063}{0,04398} = 25,08 \cdot 10^6 \text{ Pa} \quad (6.12)$$

Míra bezpečnosti pístnice (tlak) k_v :

$$k_v = \frac{\sigma_{KR}}{\sigma_{Vmax}} = \frac{336 - 0,62 \cdot \lambda}{25,08} = \frac{336 - 0,62 \cdot 6}{25,08} = 12,8 \quad (6.13)$$

Vypočítaný koeficient $k_v = 12,8$ zajišťuje vysokou bezpečnost navrženého rozměru pístnice. Výpočet míry bezpečnosti v tahu neprovádím, z důvodu nízkých hodnot zatěžující síly při otevírání formy.

6.3 Výpočet síly stěny válce pomocí teorie tlustostěnných nádob

Pro plášť navrhovaného přímočarého hydromotoru jsem zvolil materiál: ocel ST52-3 BK (podobná oceli třídy 11 523 dle ČSN).

Pevnost	$R_m = 980 \div 1180 \text{ MPa}$
Nejnižší mez kluzu	$R_e = 835 \text{ MPa}$
Bezpečnost	$k = 2$
Zkušební tlak	$p_{\max} = 40 \text{ MPa}$

Dovolené napětí σ_D :

$$\sigma_D = \frac{R_e}{k} = \frac{835}{2} = 417,5 \text{ MPa} \quad (6.14)$$

Síla stěny válce s_v :

$$s_v = \frac{D_2}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{\sigma_D + p_{\max} \cdot (1 - 2 \cdot \mu)}{\sigma_D - p_{\max} \cdot (1 + \mu)}} - 1 \right] = \frac{0,28}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{417,5 + 40 \cdot (1 - 2 \cdot 0,3)}{417,5 - 40 \cdot (1 + 0,3)}} - 1 \right] = 0,02605 \text{ m}$$

Kde: $\mu = 0,3$ Poissonův součinitel pro ocel a dvojosou napjatost (6.15)

Zvolená síla stěny válce $s_v = 0,03 \text{ m}$.

Podmínka pro tlustostěnné trubky:

$$\frac{r_2}{r_1} > 1,18 \Rightarrow \frac{0,17}{0,14} = 1,214 \quad (6.16)$$

6.4 Výpočet průtoků kapaliny v jednotlivých fázích pohybu hydromotoru

Pro dosažení zadaných rychlostí pohybu hydromotoru a navržení správné velikosti prvků, je nutné vypočítat potřebné průtoky kapaliny ve všech fázích pohybu hydromotoru. Opět budu vycházet z obrázku 6.1.

Uzavírání formy – rychloposuv ($v_1 = 0,68 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

– plnění kanálem R1:

$$Q_{R1} = S_1 \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi \cdot d_1^2 \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,056^2 \cdot 0,68 = 0,00167 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.17)$$

– sání kanály T1 a T2:

$$Q_{Tu} = S_2 \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi (D_2^2 - d_1^2) \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi (0,28^2 - 0,056^2) \cdot 0,68 = 0,0401 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.18)$$

– vypouštění kanálem R3:

$$Q_{T3} = S_3 \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi (D_2^2 - d_2^2) \cdot v_1 = \frac{1}{4} \pi (0,28^2 - 0,27^2) \cdot 0,68 = 0,00293 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.19)$$

Uzavírání – mikroposuv ($v_2 = 0,027 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

– plnění komory R2:

$$Q_{R2} = S_2 \cdot v_2 = \frac{1}{4} \pi \cdot D_2^2 \cdot v_2 = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,28^2 \cdot 0,027 = 0,00166 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.20)$$

Otevírání formy ($v_3 = 0,385 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

– plnění komory R3:

$$Q_{R3} = S_3 \cdot v_3 = \frac{1}{4} \pi \cdot (D_2^2 - d_2^2) \cdot v_3 = \frac{1}{4} \pi \cdot (0,28^2 - 0,27^2) \cdot 0,385 = 0,00163 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.21)$$

– vypouštění kanály T1 a T2:

$$Q_{To} = S_2 \cdot v_3 = \frac{1}{4} \pi \cdot D_2^2 \cdot v_3 = \frac{1}{4} \pi \cdot 0,28^2 \cdot 0,385 = 0,02371 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.22)$$

Otevírání formy – diferenciální zapojení ($v_4 = 0,87 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

– plnění komory R3:

$$Q(d)_{R3} = S_3 \cdot v_4 = \frac{1}{4} \pi \cdot (D_2^2 - d_2^2) \cdot v_4 = \frac{1}{4} \pi \cdot (0,28^2 - 0,27^2) \cdot 0,87 = 0,00369 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.23)$$

– vypouštění kanály T1 a T2:

$$Q(d)_{To} = S_2 \cdot v_4 = \frac{1}{4} \pi \cdot (D_2^2 - d_1^2) \cdot v_4 = \frac{1}{4} \pi \cdot (0,28^2 - 0,056^2) \cdot 0,87 = 0,05367 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6.24)$$

Maximální průtok dodávaný hydrogenerátorem:

$$Q_{H \max} = Q_{R1} \cdot \frac{1}{\eta_Q} = 0,00167 \cdot \frac{1}{0,92} = 0,00182 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} = 109,2 \text{ dm}^3 \text{ min}^{-1} \quad (6.25)$$

6.5 Průběh rychlostí pohybu hydromotoru

Nyní se zaměřím na dynamické chování pohonu při rozběhu a brždění hydromotoru (obr. 6.2). Zrychlení na hydromotoru je dáno dobou rozběhu, kterou zvolím a v případě potřeby ji později změním. Volím dobu rozběhu pístnice $t_{R1} = 0,2 \text{ s}$. Známe-li požadovanou ustálenou rychlost v_1 , vypočítám zrychlení:

$$a = \frac{v_1}{t_{R1}} = \frac{0,68}{0,2} = 3,4 \text{ m.s}^{-2} \quad (6.26)$$

Uzavírání formy:

Doba brždění t_{B1} na ustálenou rychlost v_2 :

$$t_{B1} = \frac{v_1 - v_2}{a} = \frac{0,68 - 0,027}{3,4} = 0,192 \text{ s} \quad (6.27)$$

Doba brždění t_{B2} na nulovou rychlost:

$$t_{B2} = \frac{v_2}{a} = \frac{0,027}{3,4} = 0,008 \text{ s} \quad (6.28)$$

Doba t_{U2} ustáleného pohybu rychlostí v_2 na dráze 15 mm:

$$t_{U2} = \frac{0,015}{v_2} = \frac{0,015}{0,027} = 0,555 \text{ s} \quad (6.29)$$

Doba t_{U1} ustáleného pohybu rychlostí v_1 :

$$t_{U1} = \frac{s_{U1}}{v_1} = \frac{0,289}{0,68} = 0,425 \text{ s} \quad (6.30)$$

Celková doba uzavírání formy T_U :

$$T_U = t_{R1} + t_{U1} + t_{B1} + t_{U2} + t_{B2} = 0,2 + 0,425 + 0,192 + 0,555 + 0,008 = 1,38 \text{ s} \quad (6.31)$$

Otevírání formy:

Doba rozběhu pístnice t_{R2} na ustálenou rychlost v_3 :

$$t_{R2} = \frac{v_3}{a} = \frac{0,385}{3,4} = 0,113 \text{ s} \quad (6.32)$$

Doba rozběhu pístnice t_{R3} na ustálenou rychlost v_4 :

$$t_{R3} = \frac{v_4 - v_3}{a} = \frac{0,87 - 0,385}{3,4} = 0,142 \text{ s} \quad (6.33)$$

Doba brždění pístnice t_{B3} na nulovou rychlost – výchozí pozice:

$$t_{B3} = \frac{v_4}{a} = \frac{0,87}{3,4} = 0,256 \text{ s} \quad (6.34)$$

Doba t_{U3} ustáleného pohybu rychlostí v_3 na dráze 150 mm:

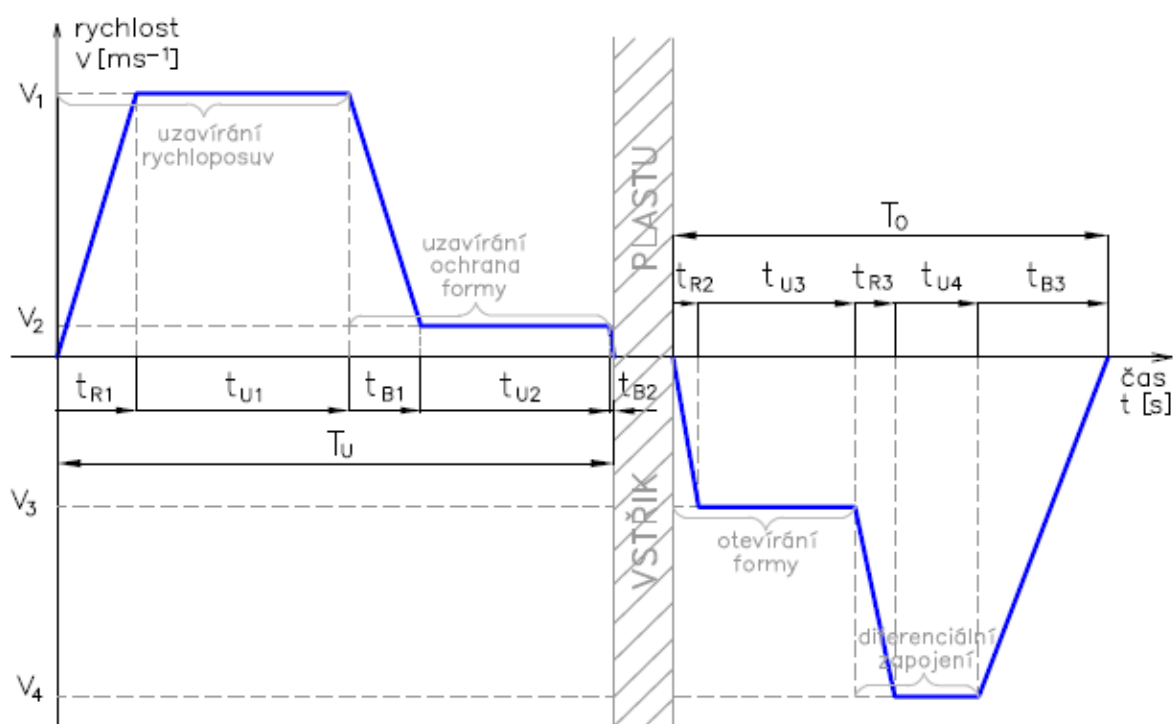
$$t_{U3} = \frac{0,15}{v_3} = \frac{0,15}{0,385} = 0,389 \text{ s} \quad (6.35)$$

Doba t_{U4} ustáleného pohybu rychlostí v_4 :

$$t_{U4} = \frac{s_{U4}}{v_4} = \frac{0,133}{0,87} = 0,153 \text{ s} \quad (6.36)$$

Celková doba otevírání formy T_O :

$$T_O = t_{R2} + t_{U3} + t_{R3} + t_{U4} + t_{B3} = 0,113 + 0,389 + 0,142 + 0,153 + 0,256 = 1,053 \text{ s} \quad (6.37)$$



Obrázek 6.2 Požadovaný průběh rychlostí v pohybu hydromotoru

v – rychlost pístnice hydromotoru, t_R – doba zrychlení hydromotoru, t_B – doba brždění, t_U – doba ustáleného pohybu, T – celková doba chodu

6.6 Rozběh a brždění hydromotoru

Pro výpočet vlastní frekvence přímočarého hydromotoru se zátěží musíme uvažovat jednak s vlastní hmotností hydromotoru, hmotností zátěže, dále se stlačitelností kapaliny v prostoru hydraulického válce, a případně uvažujeme i vliv viskózního tlumení pístu nebo zátěže. Při špatném návrhu pohonného ústrojí se mohou vyskytovat nežádoucí jevy jako například vysoká hlučnost, zhoršená účinnost a v horším případě (při provozu na vlastní frekvenci) až destruktivní poškození částí pohonu.

Tabulka 4 – Hmotnost soustavy pohonu

Součást	Hmotnost
Přítlačná deska 0,59x0,59x0,14 m	382 kg
Polovina lisovací formy	334 kg
Píst a pístnice	185 kg
Celková hmotnost pohyblivé soustavy m_c	901 kg

Minimální statická tuhost sdruženého hydromotoru k_h :

$$k_h = \frac{S_1 \cdot K}{h} = \frac{\frac{1}{4} \pi \cdot d_1^2 \cdot K}{h} = \frac{\frac{1}{4} \pi \cdot 0,056^2 \cdot 1,2 \cdot 10^9}{0,45} = 6,57 \cdot 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \quad (6.38)$$

Kde: K modul objemové stlačitelnosti kapaliny [Pa]

h aktuální zdvih [m]

S_1 účinná plocha pístu [m²]

Vlastní frekvence hydromotoru se zátěží f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_h}{m_c}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{6,57 \cdot 10^6}{901}} = 13,59 \text{ s}^{-1} \quad (6.39)$$

Vlastní kruhová frekvence hydromotoru se zátěží ω_0 :

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot 13,59 = 85,38 \text{ s}^{-1} \quad (6.40)$$

Dovolená budící frekvence ω_B :

$$\omega_B = \frac{\omega_0}{3} = \frac{85,38}{3} = 28,46 \text{ s}^{-1} \quad (6.41)$$

Časová konstanta budícího signálu T_B :

$$T_B = \frac{1}{\omega_B} = \frac{1}{28,46} = 0,035 \text{ s} \quad (6.42)$$

Doporučená hodnota doby nárůstu/poklesu rampové funkce t_a, t_b :

$$t_a = t_b = (5 \div 6) \cdot T_B = 5 \cdot 0,035 = 0,175 \text{ s} \quad (6.43)$$

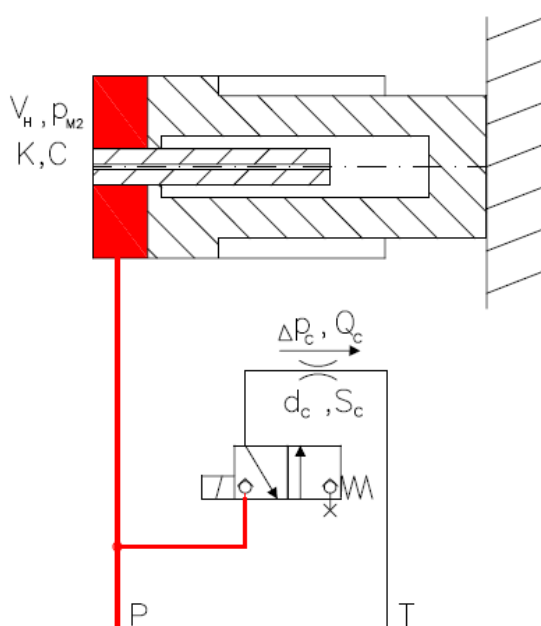
Byla splněna podmínka: $t_a, t_b \leq t_R$ a pro návrh proporcionálního rozváděče by měla být doba přestavení šoupátka (odezva na skokovou změnu řídicího signálu) kratší než spočítané hodnoty $t_a = t_b = 0,175 \text{ s}$.

6.7 Návrh dekompresního ventilu

Zařazení 3/2 rozváděče s clonou (poz. 37.2 a 41) do tlakové větve paralelně s logickým ventilem má dva významy:

- Dekompresní ventil: bezpečné odtlakování uzavíracího válce po každém vstřikovacím cyklu, tak aby v systému nedocházelo k tlakovým rázům při dekompresi po lisování.
- Zajištění bezpečného stavu: odtlakování systému při výpadku elektrické energie, nebo porušení bezpečnostních okruhů (otevření krytů vstřikolisu).

Aby se tlaková kapalina odpouštěla dekompresním ventilem co nejpomaleji, umístil jsem bezprostředně za něj do větve A clonu. Pro průměr otvoru clony $d_c = 3 \text{ mm}$ provedu výpočet časového průběhu poklesu tlaku $p = f(t)$.



Obrázek 6.3 Ventil dekomprese s clonou

Tlakový spád na cloně Δp_c :

$$\Delta p_c = p_{M2} - p_0 \cong p_{M2} = 18 \text{ MPa} \quad (6.44)$$

Kde: $p_{M2} = 18 \text{ MPa}$ pracovní tlak

$p_0 \cong 0 \text{ MPa}$ tlak v odpadní větvi (pro výpočet)

Vztahy pro průtok kapaliny clonou z tlakové nádoby Q_c :

$$Q_c = -C \cdot \frac{\Delta p_c}{\Delta t} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (6.45)$$

$$Q_c = \mu \cdot S_c \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_c}{\rho}} \quad [m^3 s^{-1}] \quad (6.46)$$

Kde: C kapacita hydromotoru naplněného tlakovou kapalinou [$m^3 Pa^{-1}$]

Δt časový interval změny tlaku v hydromotoru [s]

S_c plocha nejmenšího průměru clony [m^2]

$\mu = 0,7$ průtokový součinitel

$\rho = 880 \text{ kg} \cdot m^{-3}$ hustota minerálního oleje

$K = 1,8 \cdot 10^9 \text{ Pa}$ modul objemové stlačitelnosti

Kapacita hydromotoru C :

$$C = \frac{V_H}{K} = \frac{\frac{1}{4} \pi (D_2^2 - d_1^2) \cdot h}{K} = \frac{\pi (0,28^2 - 0,056^2) \cdot 0,45}{4 \cdot 1,8 \cdot 10^9} = 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Pa}^{-1} \quad (6.47)$$

Kde: V_H objem hydromotoru naplněného tlakovou kapalinou [m^3]

Pomocný činitel A spočítaný ze vztahů 6.45 a 6.46:

$$A = \frac{\mu \cdot S_c}{2 \cdot C} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} = \frac{0,7 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 0,003^2}{2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-11}} \cdot \sqrt{\frac{2}{880}} = 7786 \quad (6.48)$$

Doba trvání dekomprese t_d až do úplného vyrovnání tlaku v odpadní větvi (p_0):

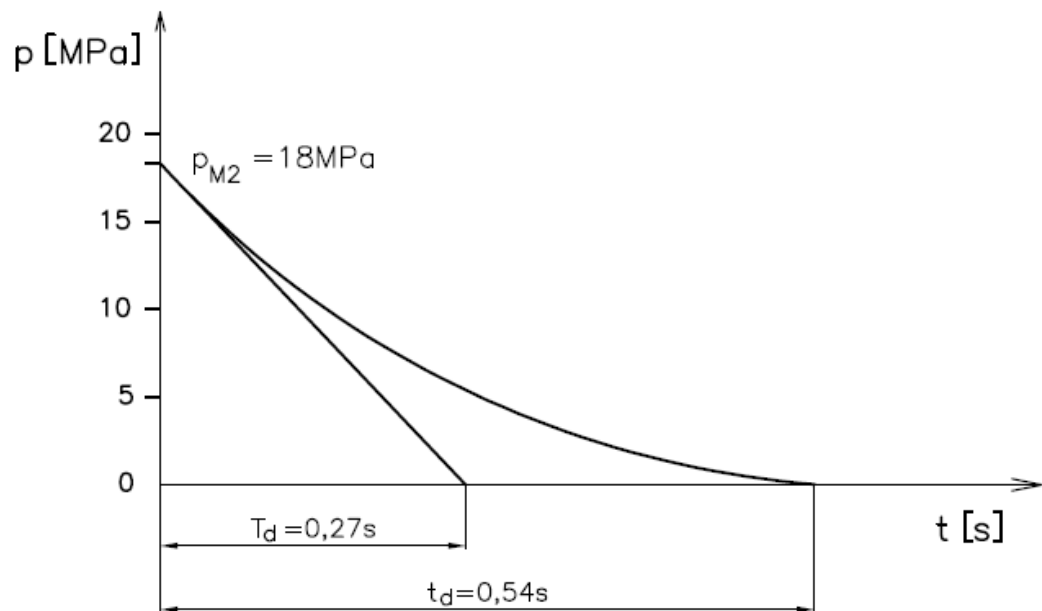
$$t_d = \frac{\sqrt{p_{M2}}}{A} = \frac{\sqrt{18 \cdot 10^6}}{7786} = 0,54 \text{ s} \quad (6.49)$$

Časová konstanta dekomprese T_d :

$$T_d = \frac{\sqrt{p_{M2}}}{2 \cdot A} = \frac{\sqrt{18 \cdot 10^6}}{2 \cdot 7786} = 0,27 \text{ s} \quad (6.50)$$

Časový průběh poklesu tlaku při dekompresi $p = f(t)$:

$$p = p_{M2} - 2At \cdot \sqrt{p_{M2}} + A^2 t^2 \quad (6.51)$$



Obrázek 6.4 Grafické znázornění průběhu poklesu tlaku při otevření dekompresního ventilu, $p = f(t)$

T_d – časová konstanta dekompresce, t_d – doba trvání dekompresce

7. Specifikace hlavních hydraulických prvků

Pozn.: pokud není uvedeno jinak, jsou navržené prvky od firmy Bosch-Rexroth.

7.1 Hydrogenerátor a elektromotor

Axiální pístový regulační hydrogenerátor: **A10VSO 100DFE1/32RVKD62N**
(hydraulické schéma - poz. 22)

Max. potřebná dodávka kapaliny Q_{Hmax} :

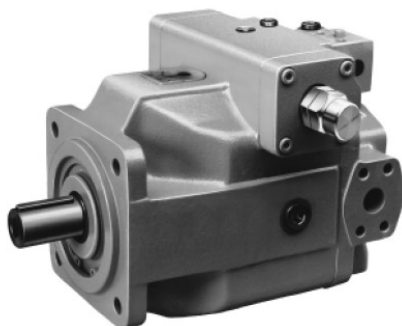
$$Q_{Hmax} = Q_{R1} \cdot \frac{1}{\eta_Q} = 0,00167 \cdot \frac{1}{0,92} = 0,00182 \text{ m}^3 \text{s}^{-1} = 109,2 \text{ dm}^3 \text{min}^{-1} \quad (7.1)$$

Potřebný geometrický objem hydrogenerátoru V_g' :

$$Q_{Hmax} = V_g' \cdot n \Rightarrow V_g' = \frac{Q_{Hmax}}{n} = \frac{0,00182 \cdot 60}{1450} = 7,53 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 = 75,3 \text{ cm}^3 \quad (7.2)$$

Kde: $n = 1450 \text{ min}^{-1}$ otáčky elektromotoru

Dodávka kapaliny	$0 \div 110 \text{ dm}^3 \text{min}^{-1}$
Max. požadovaný provozní tlak	18 MPa
Max. výstupní tlak	28 MPa
Proměnný geometrický objem V_{gmax}	100 cm^3
Rozsah viskozity	$16 \text{ až } 36 \text{ mm}^2 \text{s}^{-1}$
Max. otáčky n_{Omax}	2000 min^{-1}
Hmotnost	69 kg
Elektronická regulace tlaku, nízká úroveň hluku, vysoká účinnost.	



Obrázek 7.1 Hydrogenerátor A10VSO...DFE1

Trojfázový asynchronní elektromotor (Siemens): **1LG4 186-4AA66**
(hydraulické schéma - poz. 20)

Potřebný výkon elektromotoru P_E' :

$$P_E' = \frac{P_H}{\eta_{HC}} = \frac{Q_{H \max} \cdot p_{M1}}{\eta_{HC}} = \frac{0,00182 \cdot 12 \cdot 10^6}{0,9} = 24270 \text{ W} = 24,27 \text{ kW} \quad (7.3)$$

Kde: η_{HC} celková účinnost hydrogenerátoru [%]

Výkon elektromotoru P_E	30 kW
Otáčky	1450 min ⁻¹
Napětí	400/690 V 50Hz
Krytí	IP 55
Třída izolace	F
Čtyřpólový, patkové provedení s velkou přírubou.	

7.2 *Proporcionální rozváděč*

Proporcionální rozváděč 4/3
s integrovanou elektronikou: **4 WREE 10 W1-75-2X/G24K31/F1V**
(hydraulické schéma - poz. 33)

Karta řízení	VT-HACD-DPC-1-2X/V0/1-0-0
Skutečný průtok rozvaděčem	0,00167 m ³ s ⁻¹ (102 dm ³ min ⁻¹)
Nominální velikost	NS 10
Max. dovolený průtok	180 dm ³ min ⁻¹
Max. tlak v kanálech A, B, P (T)	31,5 MPa (21 MPa)
Napájecí napětí	24 VDC
Řídicí signál	4 ÷ 20 mA
Typ šoupátka	W1
Čistota oleje dle ISO 4406	20/18/15

7.3 *Oběhová jednotka chlazení*

(hydraulické schéma - poz. 5, 6, 9÷14)

Povrchem nádrže a teplosměnnými plochami ostatních prvků a potrubí se nestačí odvést veškerý ztrátový výkon P_z přeměněný v teplo. Zvolil jsem vodní typ chlazení z toho důvodu, že je na vstřikovacím lisu voda používána i k chlazení forem. Oběhová jednotka je tvořena elektromotorem **10** a zubovým hydrogenerátorem **12**. Na výtlaku z hydrogenerátoru

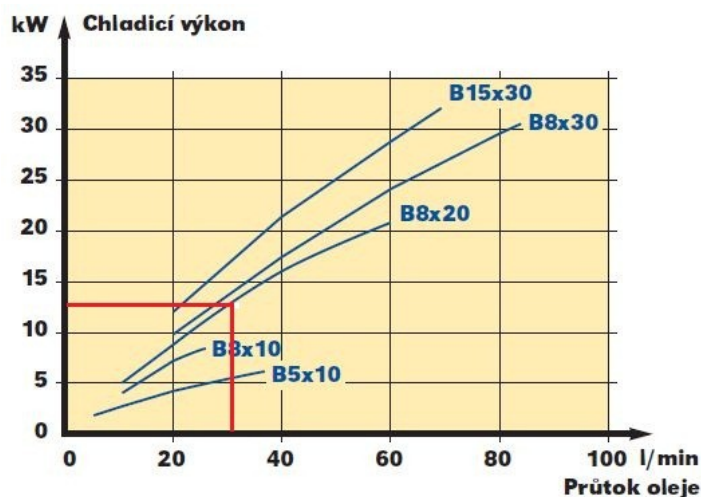
je umístěn oběhový filtr **9**, který je vybaven snímačem zanešení SP2. Následuje vodní chladič **5**, osazený na vstupu chladicí vody solenoidovým ventilem YV1.

Provozní teplota je udržována mezi 40°C a 50°C dvěma termostaty ST1 a ST2. Je-li dosažena teplota na ST2, sepne se solenoidový ventil YV1 a dojde k průtoku chladicí vody přes deskový chladič PWO B8-20 poz. **5**.

Tlakový spád, který vzniká na proporcionálním řídicím prvku, dosahuje 1 ÷ 4 MPa (obr. 7.2). Ztrátový výkon a vzniklé teplo může teoreticky dosáhnout až na hodnotu:

$$P_Z = Q_{H \max} \cdot \Delta p_p = 0,00182 \cdot 4 \cdot 10^6 = 7280 \text{ W} = 7,28 \text{ kW} \quad (7.4)$$

Výkon elektromotoru oběhové jednotky	1,1 kW
Otáčky elektromotoru oběhové jednotky	1415 min ⁻¹
Typ hydrogenerátoru	zubové s vnějším ozubením, 25 cm ³
Dodávka oběhové jednotky	34 dm ³ min ⁻¹ při tlaku 8 bar
Výkon chlazení	max. 12 kW (obr. 7.4)
Vstupní teplota vody	20°C
Oběhová filtrace	7 μm



Obrázek 7.4 Diagram chladicího výkonu vodního chladiče PWO B8-20 (Olaer)

7.4 Potrubní rozvody

Rychlost kapaliny v sání hydrogenerátoru volím $v_{sHg} = 0,5 \text{ ms}^{-1}$

Výpočet světlosti sacího potrubí hydrogenerátoru d_s :

$$d_s = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{H \max}}{\pi \cdot v_{sH}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00182}{\pi \cdot 0,5}} = 0,068 \text{ m} = 68 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Sací potrubí hydrogenerátoru volím TR 76x3,2.

Rychlost kapaliny v tlakové a zpětné větvi volím $v_{tM} = 4 \text{ ms}^{-1}$

Výpočet světlosti tlakového potrubí k hydromotoru a odpadního potrubí d_t :

$$d_t = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{H \max}}{\pi \cdot v_{tM}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00182}{\pi \cdot 4}} = 0,019 \text{ m} = 19 \text{ mm} \quad (7.6)$$

Prívodní tlakové potrubí k hydromotoru, včetně zpětného vedení, volím TR 25x3.

7.5 Hydraulický zámek

(hydraulické schéma - poz. 30)

Výpočet světlosti dvou hydraulických zámků a sacího potrubí, kterým je přisávána kapalina do hydromotoru při rychloposuvu. Rychlost kapaliny pro sání do hydromotoru volím $v_{sM} = 2 \text{ ms}^{-1}$ při průtoku $Q_{Tu} = 0,0401 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$$d_{sP} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{Tu}}{\pi \cdot v_{sM} \cdot 2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0401}{\pi \cdot 2 \cdot 2}} = 0,113 \text{ m} = 113 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Pilotně ovládaný zpětný ventil, přírubové provedení: **SF 125 B1-1-4X**

Max. operační tlak 35 MPa

Světlost ventilu DN 125

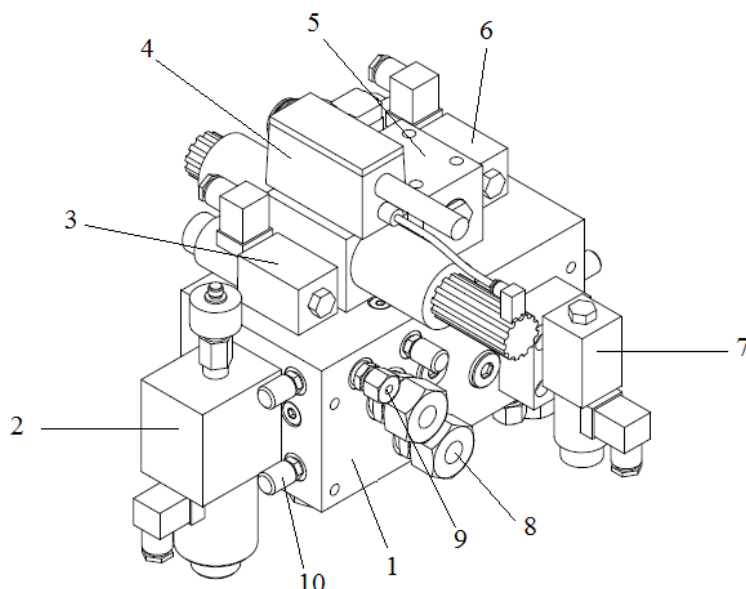


Obrázek 7.5 Hydraulický zámek serie SF

8. Konstrukční návrh ovládacího bloku zavírání formy vstřikovacího lisu

Pokud nejsou hydraulické komponenty (šoupátkové rozváděče, tlakové ventily a další) určené přímo k montáži do potrubí, montují se na separátní desky. Rozšířilo se používání sdružených segmentových desek nebo desek monoblokových. Obecným příkladem monoblokové desky je hydraulický blok v praxi nazývaný „kostka“. Kostky se používají pro velký počet komponentů s velkými světlostmi a pro dynamická zatížení.

Hydraulické rozvodné kostky jsou vyráběné dle technické dokumentace zákazníka. I mé řešení je zákaznické a je tedy nutné pro výrobu bloku navrhnout dispoziční výkres s rozmístěním všech hydraulických komponentů (2011-KOV409-03) a vrtací plán, podle kterého budou vyrobeny propojovací kanály a díry pro uchycení prvků.



Obrázek 8.2 Model osazeného rozvodného bloku

- 1 - rozvodný blok 300x160x140 mm, 47,8 kg (poz. 30)
- 2 - vstupní rozváděč 3WE10B3X/CG24N9K4 (poz. 31)
- 3 - řízení otevírání zámků 3WE6B6X/EG24N9K4 (poz. 34)
- 4 - proporcionální rozváděč 4WREE10W1-75-2X/G24K31/F1V (poz. 33)
- 5 - rozváděč diferenciálního zapojení 4WE10D3X/CG24N9K4 (poz. 32)
- 6 - dekompresní ventil M-3SED6UK2X/420G24N9K4 (poz. 37.2)
- 7 - logický ventil LC16A10E7X (poz. 35), víko logického ventilu LFA16WEA-71/H10 (poz. 36), rozváděč M-3SED6UK2X/420G24N9K4 (poz. 37.1)
- 8, 9 – přímé spojky pro potrubí
- 10 – měřicí přípojky

Dispozice bloku uzávěru formy – výkres číslo 2011-KOV409-03

Specifikace prvků bloku – výkres číslo 2011-KOV409-04

9. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout elektrohydraulický lineární pohon uzavírání formy vstřikovacího lisu na plasty za daných parametrů.

V úvodu jsem nejprve podrobně popsal všechny důležité části lisovacího stroje a jejich funkci. Teprve až po důkladném seznámení se s předmětem rekonstrukce a všech fází lisovacího procesu, bylo možné přistoupit k návrhu funkčního hydraulického schéma a výpočtové části.

Na základě analýzy funkce stroje byly navrženy možné varianty řešení elektrohydraulického řízení lisu. Z porovnání navržených variant, kde byly uvažované hlediska úspornosti, přesnosti řízení a dynamiky systému, jsem vybral variantu s regulačním hydrogenerátorem (regulační systém SYDFE) v kombinaci s proporcionálním rozváděčem. Tato varianta v porovnání s první variantou, neobsahuje pojistný ventil a akumulátor. Je charakteristická především použitím sdruženého hydromotoru se třemi komorami.

Při výpočtech statických a dynamických parametrů jsem se zaměřil na rozměry hydromotoru a velikost potřebných průtoků. Dále jsem spočítal čas jednotlivých fází lisovacího cyklu a navrhl průběh rychlostí v závislosti na čase. Ověřil jsem dynamické chování systému při rozběhu a brždění. A provedl jsem návrh dekompresního ventilu pro bezpečné odtlačování válce.

Na závěr jsem podrobně vyspecifikoval hlavní hydraulické prvky obvodu a provedl konstrukční návrh ovládacího bloku zavírání formy.

Všechny body zadání diplomové práce byly zpracovány a výsledkem je funkční hydraulické schéma včetně specifikace prvků, návrh regulačního systému řízení, výkres s dispozicí rozváděcího bloku a specifikací prvků.

Pro rekonstrukci vstřikolisu byly navrženy nejmodernější hydraulické prvky, které by měly do budoucna zajistit přesnou a rychlou výrobu. Jedině tak je možné dosáhnout brzké návratnosti nákladů vynaložených na rekonstrukci lisu. Realizace může přinést v uživatelské sféře zvýšení produkce, kvality výrobku a zkrácení prostojů zařízení.

10. Přílohy

Ferromatik F110 - fotografická část



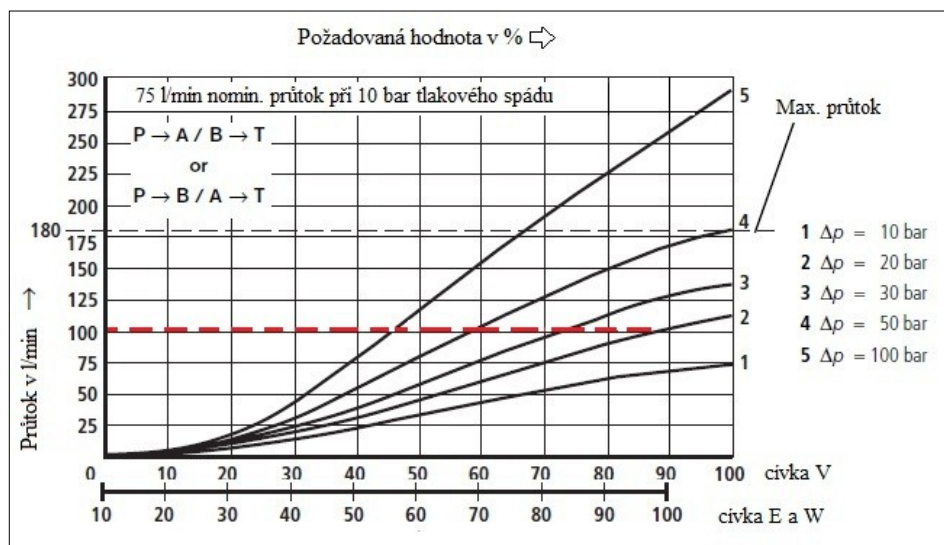
Obr. 9.1
Celkový pohled na vstřikovací lis
Ferromatik F110.



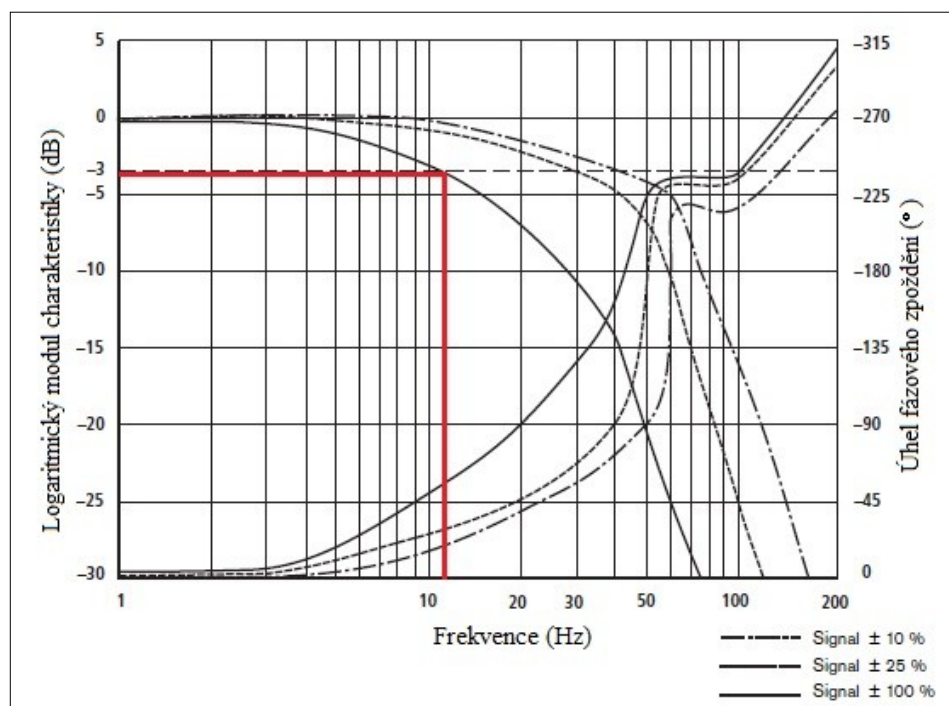
Obr. 9.2
Hydromotor uzavírání formy (vlevo)
a otevřená část uchycení formy



Obr. 9.3
Vstřikovací jednotka s násypkou,
elektroskříň, hydrogenerátor a
elektromotor



Obrázek 9.4 Charakteristická křivka proporcionální rozváděče 4WRE, DN10



Obrázek 9.5 Logaritnická modulová a fázová frekvenční charakteristika rozváděče 4WRE, DN10

Seznam příloh:

Uzávěr formy vstřikolisu - hydraulické schéma
2011-KOV409-01 (1 list A2)

Uzávěr formy vstřikolisu - specifikace prvků
2011-KOV409-02 (3 listy A4)

Dispozice bloku - konstrukční návrh
2011-KOV409-03 (1 list A3)

Dispozice bloku - specifikace prvků
2011-KOV409-04 (1 list A4)

Literatura

- [1] ZEMAN, L. *Vstřikování plastů*. Ostrava: BEN - technická literatura, 2009. 112 s. ISBN 978-80-7300-250-3
- [2] Kolektiv autorů. *Vstřikování termoplastů*. Praha: ŠMÍD a spol., s.r.o., Přeložené vydání příručky společnosti BATTENFELD. 89 s.
- [3] KOPÁČEK, J., PAVLOK, B. *Tekutinové mechanismy*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. 1. vydání, 156 s. ISBN 80-7078-238-2
- [4] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, Díl 1. Kapaliny v hydraulických mechanismech hydrostatické převodníky*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 1999. 1. vydání, 158 s. ISBN 80-7078-620-5
- [5] PAVLOK, B. *Hydraulické prvky a systémy, Díl 2. Řídicí prvky hydrostatických systémů příslušenství hydraulických obvodů*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2008. 1. vydání, 150 s. ISBN 978-80-248-1827-6
- [6] PAVLOK, B., HRUŽÍK, L., BOVA, M. *Hydraulická zařízení strojů*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. Učební text. 116 s.
- [7] RÝC, Z., PAVLOK, B. *Hydraulické pohony a jejich regulace*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1984. I. vydání, 166 s. ISBN 3174033782
- [8] CASEY, B. *Insider Secrets to Hydraulics*. Hydraulic Supermarket, 2002. paperback 1st edition. 128 s. ISBN 0958149305
- [9] *Fluidní technika, Průmyslová hydraulika - základy*. Brno: Bosch Rexroth, spol. s r.o., školení a poradenství, 2007. 257 s. RCZ000-02/12.06
- [10] HRDINA, J. Hydraulické pohony tvářecích strojů. *AUTOMA časopis pro automatizační techniku*, 2008, číslo 10, s. 22-23
- [11] Webové stránky výrobce vstřikovacích lisů ARBURG
<http://www.arburg.com/com/CZ/cs/index.jsp>
- [12] Webové stránky výrobce vstřikovacích lisů ENGEL
http://www.engelglobal.com/engel_web/global/de/index.htm
- [13] Katalogové podklady firem: Bosch Rexroth, Olaer, Atos, Parker, Hydrocom, Metra Blansko, VDI Obzor, SCEM, Internormen, KTR, Siemens, Caproni, Charvát, Barpis, ASM
- [14] Projekční podklady firmy OCHI Inženýring spol. s r.o.

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Bohuslavu Pavlokoví, CSc. za laskavou pomoc a cenné připomínky, podněty a rady při tvorbě této diplomové práce. Poděkování právem náleží i mé rodině za trpělivost a vytvoření optimálních studijních podmínek.